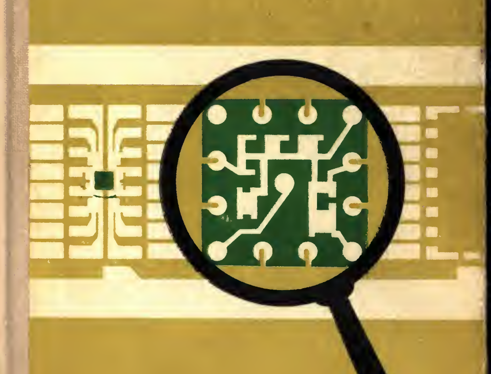
О. Д. ПАРФЁНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ



О. Д. ПАРФЕНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов по специальностям
«Электронные вычислительные машины»
и «Конструирование и производство
электронно-вычислительной аппаратуры»



«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
МОСКВА 1977

6Ф0.3
П18
УДК 621.38(075)

Рецензенты:

Кафедра КиП ЭВА Ленинградского института точной механики и оптики (зав. кафедрой доц. Новиков В. В.)
Зав. кафедрой «Микроэлектроника» Московского института электронного машиностроения проф. Яншин А. А.

Олег Дмитриевич Парфенов

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ

Редактор Л. А. Романова. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Обложка художника Ю. Д. Федичкина. Технический редактор Л. А. Григорчук. Корректор М. М. Малиовская.

И Б № 723

Т—03140 Сдано в набор 16/IX—76 г. Подп. к печати 21/III—77 г. Формат 84×108¹/₃₂ Бум. тип. № 2. Объем 8 печ. л. 13,44 усл. п. л. 13,66 уч.-изд. л. Изд. № ЭР—188 Тираж 20 000 экз. Цена 66 коп. План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1977 г. Позиция № 120. Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.
Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Хохловский пер., 7. Зак. 1456.

Парфенов О. Д.

П18 Технология микросхем. Учеб. пособие для специальностей «Электронные вычислительные машины» и «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры» вузов. М., «Высш. школа», 1977.

256 с. с ил.

В книге рассмотрены: технология полупроводниковых интегральных микросхем (диффузия, эпитаксия, пассивация, межсоединения, фотолитография); технология гибридных пленочных микросхем (физические основы и техника термического вакуумного напыления, активные и пассивные тонкопленочные элементы, методы контроля тонкопленочных элементов в процессе напыления, распыление ионной бомбардировкой, технологические особенности толстопленочных микросхем); сборка микросхем (монтажно-сборочные операции, крепление подложек и кристаллов, герметизация).

$П \frac{30406-237}{001(01)-77} 120-77$ 6Ф0.3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие охватывает часть курса «Технология микросхем и элементов ЭВА» и посвящено основным процессам производства микросхем. Особое внимание в пособии уделено физико-химическим процессам производства, от которых зависят электрические параметры микросхем, их надежность и экономичность.

С учетом того, что курс «Конструкционные материалы и их обработка» изучается студентами раньше, в настоящем пособии не рассматриваются полупроводниковая металлургия, резка, шлифовка и полировка полупроводниковых пластин, технология изготовления корпусов, физические основы ультразвуковой, электронно-лучевой и лазерной обработки, процессы сварки и пайки.

В основу книги положены лекции, читаемые автором в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Автор выражает искреннюю благодарность К. Б. Лукину, оказавшему помощь в подборе и обработке материалов по ряду вопросов, а также коллективу кафедры «Конструирование и производство ЭВА» Ленинградского института точной механики и оптики (зав. кафедрой канд. техн. наук, доцент В. В. Новиков) и докт. техн. наук А. А. Яншину за ценные замечания и советы при рецензировании рукописи.

Отзывы и предложения по книге просьба направлять по адресу: Москва, 103715, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное усложнение задач, решаемых радиоэлектронной аппаратурой, и расширение диапазона механических и климатических условий ее работы привели к высокому функциональному насыщению аппаратуры, что обусловило увеличение габаритов и массы. Потребовались новые принципы конструирования и изготовления аппаратуры, позволяющие повысить плотность заполнения объема. Так возникло новое направление в радиоэлектронике — микроминиатюризация. В основу микроминиатюризации был положен функционально-узловой метод конструирования, который в свою очередь стал возможен благодаря широкому внедрению в РЭА полупроводниковых элементов и печатных плат.

На первом этапе развития микроминиатюризации ставилась одна задача — повышение плотности монтажа элементов на несколько порядков по сравнению с обычной «классической» аппаратурой на печатных платах и стандартных радиоэлементах.

Типичными представителями «классической» аппаратуры являются *плоские модули* ФЭ (рис. В.1, *а*), «Элемент-2» и др. Невысокая плотность монтажа элементов (0,5—0,8 эл/см^3) обусловлена здесь технологическими требованиями (возможностью механизации и автоматизации монтажа), в соответствии с которыми размещение элементов на плате принято одностороннее и параллельно кромкам платы.

Уплотнение монтажа стандартных радиоэлементов возможно только за счет ухудшения технологичности конструкции (объемные и объемно-плоскостные модули). В *объемно-плоскостном модуле,* схема которого показана на рис. В.1, *б*, повышение плотности монтажа до нескольких элементов в 1 см^3 достигается за счет смешанного

способа установки элементов (горизонтального двустороннего и вертикального межплатного). Высокая трудоемкость ручного монтажа существенно ухудшает экономические показатели серийного производства объемно-плоскостных модулей. Миниатюрные электронные модули стали возможны благодаря освобождению радиоэле-

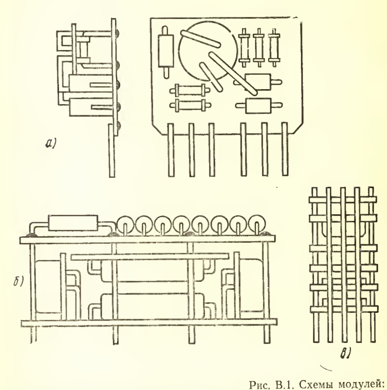


Рис. В.1. Схемы модулей:

а — плоский модуль ФЭ (без корпуса); *б* — объемно-плоскостной модуль с уплотненным монтажом; *в* — микромодуль этажерочной конструкции (без герметизации)

ментов от индивидуального корпуса и деталей арматуры и размещению их активной части на общей плате (плоские микромодули) или на индивидуальной стандартной микроплате с последующей сборкой в модуль — *объемные*, или *этажерочные микромодули* (рис. В.1, *в*). Последние обеспечили плотность монтажа до 15 эл/см^3 и технологичность в серийном производстве благодаря единооб-

рацию формы и размеров микроэлементов (возможность механизации и автоматизации производства).

Модули и микромодули на дискретных элементах, т. е. узлы, получаемые последовательной сборкой готовых элементов, имеют значительное число паяных (или сварных) соединений, что является основной причиной отказов аппаратуры. Этажерочные микромодули оказались непригодными для аппаратуры, работающей в условиях длительной эксплуатации без участия человека (например, аппаратура искусственных спутников земли).

В дальнейшем микроминиатюризация развивается в двух направлениях: создаются *пленочные* и *полупроводниковые микросхемы* *. Существенное повышение плотности монтажа (до 100—200 эл/см³ в пленочных схемах и до 1000 эл/см³ в полупроводниковых) достигается за счет освобождения элементов схемы от вспомогательных деталей, размещения их на общем основании и замены обычных внутрисхемных соединений (пайки, сварки и т. п.) непосредственным контактированием отдельных слоев и областей схемы в процессе ее изготовления.

Таким образом, интегральная схема (ИС) представляет собой совокупность электрически связанных и конструктивно неотделимых микроэлементов, непосредственно формируемых в процессе изготовления схемы на поверхности или в объеме общего основания.

В отличие от пленочных микросхем, где элементы формируются на поверхности изоляционного основания в виде пленок проводящих, резистивных, диэлектрических, в полупроводниковой микросхеме элементы выполняют на базе полупроводникового основания-кристалла за счет локального изменения электрофизических свойств материала. На поверхность кристалла выносят лишь пленочные проводники для внутрисхемного соединения *(межсоединения)*.

В связи с ограничениями по точности и стабильности параметров элементов интегральных схем, а также из-за технологических трудностей используют и комбинированные микросхемы, отступая от единого процесса формирования элементов.

Так, гибридной микросхемой называют комбинированную пленочную микросхему, в которой не-

* Основные термины и определения в области микросхем установлены ГОСТ 17021—71 «Микросхемы. Термины и определения».

которые элементы (обычно активные) являются дискретными и монтируются как навесные.

Совмещенная микросхема — это комбинированная полупроводниковая интегральная микросхема, в которой отдельные элементы (обычно пассивные) выполняют на поверхности кристалла методами пленочной технологии.

В гибридной микросхеме в качестве навесных элементов возможны не только приборы, но и интегральные микросхемы, которые имеют отдельное конструктивное оформление (в частности корпусное) и могут быть испытаны до монтажа на общую диэлектрическую подложку. Такие сложные гибридные микросхемы называют микросборками. При наличии в составе микросборок многовыводных интегральных схем предполагается использование многослойных (многоуровневых) межсоединений на общей подложке. Последние могут выполняться по тонкопленочной или толстопленочной технологии.

Важной конструктивно-технологической характеристикой интегральных микросхем является *степень интеграции*

$$g = \lg N,$$

где N — количество элементов, объединенных общей подложкой.

Увеличение степени интеграции ведет к повышению надежности (за счет сокращения числа паяных и сварных соединений), быстродействия и снижению стоимости. Однако последний показатель тесно связан с совершенством технологии, так как с повышением степени интеграции при неизменном уровне технологии выход годных микросхем быстро падает. Если уровень технологии условно характеризовать средней вероятностью выхода годного элемента P, то вероятность выхода годной подложки с N элементами составит P^N.

Микросхемы можно условно делить на малые, средние и большие интегральные схемы (БИС) со степенью интеграции соответственно 1, 2 и 3.

По мере совершенствования технологии и повышения выхода годных микросхем, снижения потребляемой мощности, улучшения теплоотвода, повышения помехоустойчивости и т. д. становится возможным дальнейшее увеличение степени интеграции.

Микросборки, являющиеся по существу *большими гибридными схемами*, позволяют в определенной степени достичь компромисса между требованиями высокой надежности и быстродействия, малых габаритов и веса, с одной стороны, и высокого процента выхода годных микросхем — с другой.

Наиболее сложные задачи в микроэлектронике стоят перед технологией, которая призвана обеспечить высокие воспроизводимость параметров схем и надежность в условиях, когда возможность подгонки параметров элементов, а тем более их замены практически исключается.

Главным при конструировании микросхем является выбор технологичных и стабильных по свойствам материалов, определение оптимальной структуры и топологии схемы и надежная ее защита от внешних воздействий. Технология и конструирование в микроэлектронике неотделимы.

Специфические задачи возникают и перед схемотехникой. Основной из них является разработка надежных схем, устойчиво работающих при низких уровнях мощности (малая допустимая мощность рассеяния), в условиях сильных паразитных связей (высокая плотность монтажа элементов) и при ограничениях по точности и стабильности параметров элементов.

Особая проблема, имеющая огромное экономическое значение, — это унификация микросхем. Переходя к интегральным микросхемам, тем самым отказываются от дискретных стандартных радиоэлементов — элементарных «кирпичиков», позволяющих строить электронные устройства с разнообразными характеристиками. Проблема, следовательно, заключается в разработке возможно более узкого ряда унифицированных функциональных схем (с достаточно универсальными характеристиками), на базе которого можно создавать сложные схемы для решения разнообразных технических задач. Нередко микросхему-модуль называют «элементом».

Научной базой развития микроэлектроники является физика, изучающая эффекты и явления, которые могут быть использованы для создания новых приборов-элементов, материалы и их свойства, новые принципы технологической обработки изделий микроэлектроники.

Как было отмечено, помимо уменьшения габаритов и веса ставится задача существенного повышения надеж-

ности и быстродействия микроэлектронной аппаратуры, снижения ее стоимости.

Повышение надежности возможно не только за счет сокращения числа паяных соединений, но и хорошего согласования температурных коэффициентов линейного расширения (особенно в полупроводниковых ИС), высокой стойкости против динамических воздействий, ремонтопригодности, резервирования, а также стерильных условий выполнения операций и автоматизации технологических процессов.

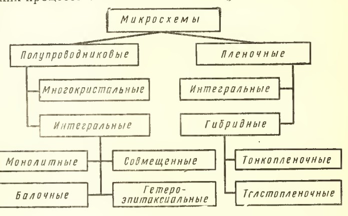


Рис. В.2. Классификация микросхем

Повышение быстродействия связано со значительным сокращением длины коммутационных связей (снижение паразитных емкостей и индуктивностей), которая является более существенным фактором, чем увеличение паразитных параметров вследствие плотного размещения элементов и проводников.

Стоимость микросхем превышает стоимость стандартных полупроводниковых приборов. Это в значительной мере объясняется использованием дорогого и порой уникального оборудования, сверхчистых основных и вспомогательных материалов, а главное — невысоким процентом выхода годных микросхем. Однако прогресс в области технологии и укрупнение производства на базе унификации схемных решений дают основание считать, что в ближайшие годы стоимость интегральных схем станет соизмеримой со стоимостью обычных дискретных приборов.

Микросхемы и особенно полупроводниковые интегральные схемы широко применяют прежде всего в цифровой вычислительной технике. Это обусловлено, с одной стороны, высокой повторяемостью функциональных схем-ячеек, что создает предпосылки для организации крупносерийного и массового производства, а с другой стороны, — относительно низкими требованиями к параметрам элементов.

Все шире используется интегральная технология и в производстве оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), устройств ввода, матричных преобразователей изображения, устройств цифровой индикации и т. д.

На рис. В.2 представлена конструктивно-технологическая классификация микросхем, в основу которой положены метод создания активных и пассивных элементов и метод получения межэлементной изоляции.

Глава первая

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

§ 1.1. Общая характеристика технологического процесса

Функциональные свойства и электрические характеристики полупроводниковой ИС полностью определяются ее *структурой* и *топологией*.

Под структурой ИС понимают определенное расположение по глубине кристалла локальных областей, отличающихся толщиной, типом электропроводности и характером распределения примеси. О структуре ИС можно судить по структуре наиболее сложного элемента — транзистора.

Топология определяет геометрические размеры отдельных областей и элементов и их взаимное расположение в плане, а также рисунок межэлементных соединений (межсоединений).

Элементы полупроводниковых ИС формируются в монокристалле полупроводника (обычно кремния), равномерно легированного примесью, обеспечивающей электронную или дырочную электропроводность.

Структуры монолитных ИС. На рис. 1.1 изображена структура элементов монолитной диффузионно-планарной интегральной микросхемы.

В окисле кремния, покрывающем кристалл кремния *p*-типа, методом точного фототравления (микрофотолитографии) вскрывают окна, через которые путем диффузии осуществляется внедрение атомов примеси-донора. Таким образом одновременно создаются коллекторные области всех транзисторов, а также изолирующие области всех диодов, резисторов и конденсаторов.

Последующее окисление пластины «закрывает» ранее вытравленные окна. Вторичное вскрытие окон меньших размеров в окисле и диффузия примеси-акцептора формируют *p*-области, выполняющие роль баз транзисторов, анодов диодов, резисторов. Второй этап диффузии также заканчивается окислением. В результате третьего этапа фотолитографии, диффузии и окисления получают *n*-области, которые становятся эмиттерами транзисторов, катодами диодов и нижними обкладками конденсаторов (n^+-области).

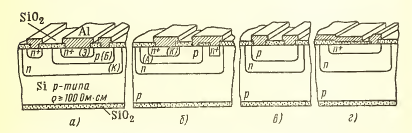


Рис. 1.1. Структура элементов монолитной диффузионно-планарной ИС:
а — транзистора; *б* — диода; *в* — резистора; *г* — МДП-конденсатора

Для создания межэлементных электрических связей в слое окисла вновь вскрывают окна и плоскость кристалла покрывают сплошной металлической пленкой (металлизация). При этом в местах, свободных от окисла, образуется омический контакт с соответствующими диффузионными областями. Межсоединения выполняют согласно схеме с помощью фотолитографии по металлической пленке. Последующие сборочно-монтажные операции предусматривают монтаж кристалла в корпусе, присоединение внешних выводов к контактным площадкам кристалла, присоединение выводов кристалла к выводам корпуса и герметизацию корпуса.

В рассмотренной планарной структуре взаимная изоляция элементов осуществляется с помощью *p-n*-переходов, образованных на первом этапе диффузии. В процессе работы схемы на *p-n*-переходах поддерживается обратное напряжение для того, чтобы уменьшить пассивные (емкости и утечки) и активные (за счет паразитных приборов) дополнительные эффекты.

Особенностью планарного транзистора является расположение коллекторного контакта в одной плоскости с базовым и эмиттерным контактами. Вследствие этого коллекторные токи преодолевают протяженный горизонтальный участок коллектора (под дном базы), прежде чем достигнут коллекторного контакта. Повышенное сопротивление коллектора увеличивает напряжение насыщения на коллекторе и снижает быстродействие переключательного транзистора. В то же время для уменьшения емкости и увеличения пробивного напряжения перехода

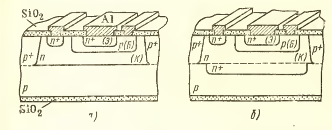


Рис. 1.2. Структура транзистора эпитаксиально-планарной ИС:

а — без скрытого слоя; *б* — со скрытым n^+-слоем

коллектор — база удельное сопротивление коллектора должно быть высоким (по крайней мере в слое, примыкающем к переходу). С помощью диффузионного коллектора трудно удовлетворить эти противоречивые требования.

Эпитаксиально-планарная структура (рис. 1.2, *а*) позволяет найти компромиссное решение. Здесь область коллектора, а также изолирующие области других элементов формируются путем эпитаксии (осаждения слоя монокристаллического равномерно легированного кремния n-типа на подложку p-типа) и последующей изолирующей диффузии примеси p^+-типа. Последняя приводит к образованию изолированных областей, внутри которых диффузионным путем создаются элементы. Удельное сопротивление эпитаксиального слоя можно получить в достаточно широком диапазоне.

Разновидностью эпитаксиально-планарной структуры является структура со скрытым n^+-слоем (рис. 1.2, *б*). Высоколегированный (низкоомный) n^+-слой, шунтирующий высокоомную коллекторную область, позволяет

уменьшить последовательное сопротивление коллектора при сохранении малой емкости и большого пробивного напряжения на переходе коллектор — база. Скрытый слой образуют путем диффузии в подложке p-типа до эпитаксиального наращивания. Для уменьшения последующей диффузии примеси из n^+-слоя в эпитаксиальный слой используют примесь с малым коэффициентом диффузии (например, мышьяк).

Наилучшую электрическую развязку элементов обеспечивает структура с диэлектрической изоляцией (рис. 1.3). В данной структуре каждый элемент размещен в своеобразном «кармане» *, который представляет собой область монокристаллического кремния, ограниченную слоем окиси кремния.

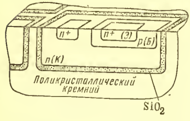


Рис. 1.3. Структура транзистора монолитной ИС с диэлектрической изоляцией (поверхностный слой окиси кремния и межсоединения условно не показаны)

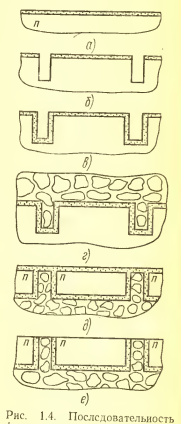


Рис. 1.4. Последовательность формирования изолированных областей в структуре с диэлектрической изоляцией:
а — исходная заготовка; *б* — после избирательного травления SiO_2 и кремния; *в* — после окисления поверхности; *г* — после осаждения поликристаллического кремния; *д* — после шлифовки монокристаллического слоя; *е* — после окисления поверхности

* В некоторых работах структуру называют «кармашковой».

Для получения такой структуры (рис. 1.4) в исходной пластине кремния n-типа методом фотолитографии производят травление двуокиси кремния, а затем глубокое травление кремния, в результате чего образуются канавки по замкнутому контуру. Далее рельефную поверхность окисляют и методом осаждения покрывают толстым (150—200 мкм) слоем кремния. Вследствие дезориентирующего влияния окисного слоя осажденный кремний получается поликристаллическим и служит конструкционным основанием будущей микросхемы. Далее с обратной стороны путем шлифовки и полировки удаляют монокристаллический материал до вскрытия окисла кремния по границам областей. После соответствующего протравливания и отмывки поверхности осуществляют ее окисление. В образованных изолированных областях монокристаллического кремния n-типа формируют элементы известным диффузионным методом. Обычным путем получают и межсоединения на поверхности пластины. Если исходная заготовка кремния n-типа имеет эпитаксиальный n^+-слой, то транзисторы получаются со скрытым n^+-слоем.

Таблица 1.1

Параметры переходов (при нулевом смещении) в эпитаксиально-планарной структуре ИС

Переход	Удельное сопротивление коллектора, Ом·см					
	0,1		0,5		1,2	
	Удельная емкость, пФ/мм²	Пробивное напряжение, В	Удельная емкость, пФ/мм²	Пробивное напряжение, В	Удельная емкость, пФ/мм²	Пробивное напряжение, В
Эмиттер — база:						
боковая стенка	1000	7	1000	7	1000	7
дно	600		450		350	
База — коллектор	350	25	200	50	150	70
Коллектор — подложка:						
боковая стенка	250	35	150	70	100	100
дно	100		100		100	

Примечания. 1. Поверхностное сопротивление эмиттера 2,5 Ом, базы — 200 Ом; удельное объемное сопротивление подложки 10 Ом·см. 2. Глубина залегания переходов: эмиттер — база — 2,3 мкм; база — коллектор — 2,7 мкм; коллектор — подложка — 12,5 мкм.

Недостатком структуры с диэлектрической изоляцией является длительность и сложность технологического процесса, в частности механической обработки, которую проводит предприятие-изготовитель микросхем.

Наибольшее распространение получили эпитаксиально-планарные структуры, достаточно полно удовлетворяющие электрическим и технологическим требованиям. В табл. 1.1 приведены параметры переходов в эпитаксиально-планарной структуре.

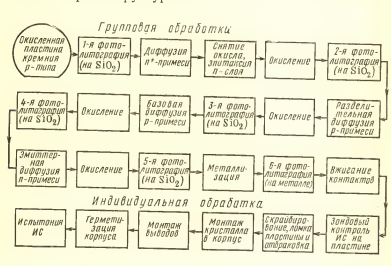


Рис. 1.5. Укрупненная схема технологического процесса изготовления ИС эпитаксиально-планарной структуры со скрытым n^+-слоем

Основной тенденцией в развитии структур полупроводниковых микросхем является совершенствование межэлементной изоляции при одновременном обеспечении оптимальных характеристик базового элемента (транзистора) и технологичности.

Схема технологического процесса. На рис. 1.5 представлена типичная укрупненная схема технологического процесса производства ИС эпитаксиально-планарной структуры на базе транзистора типа *n-p-n*. Отдельные этапы процесса — фотолитография, диффузия, контроль и испытания — состоят из 3—10 операций. Общее количество операций изготовления монолитных ИС (без учета заготовительного этапа получения пластины) свыше

100. Продолжительность полного цикла обработки около 100 ч.

Из схемы видно, что цикл групповых процессов обработки ИС заканчивается получением межсоединений — металлических проводников на поверхности кристалла. Контроль параметров отдельных элементов на предшествующих этапах производства чрезвычайно сложен и экономически не выгоден. Целесообразнее сохранять дефектные кристаллы в пластине до конца групповой обработки, а отбраковку выполнять после выполнения межсоединений путем комплексной проверки ИС на функционирование. Однако специальный анализ брака ИС на отдельных этапах представляет большой интерес с точки зрения выявления узких мест производства. В табл. 1.2 приведен результат анализа распределения брака по отдельным этапам производства, откуда видно, что на индивидуальную обработку поступает лишь около половины кристаллов. Окончательный процент выхода годных ИС свидетельствует о том, что в производство следует запускать в 4 раза больше схем, чем это требуется по плану.

Таблица 1.2

Выход годных монолитных ИС *

Наименование этапа процесса	Выход на отдельных этапах, %	Общий выход, %
Разделительная диффузия	95	95
Диффузия базы	90	86
Диффузия эмиттера	85	72
Образование межсоединений	90	65
Контроль на функционирование	75	49
Скрайбирование	85	42
Монтаж выводов	85	35
Герметизация	95	34
Окончательные испытания	75	25

* По данным производства США, 1966 г. В настоящее время выход годных ИС средней степени интеграции достигает 40—50%.

Точность выходных характеристик ИС непосредственно зависит от точности электрофизических параметров диффузионных областей. Поэтому важным этапом является межоперационный контроль в процессе диффузии (обычно с помощью пластины-свидетеля). В табл. 1.3 даны характерные величины параметров эпитаксиально-планарной структуры ИС и допуски на них.

Таблица 1.3

Типичные для эпитаксиально-планарных ИС параметры и допуски

Параметры	Номинальное значение	Допуск, %
Поверхностное сопротивление, Ом:		
эпитаксиального слоя	150	±15
диффузионной базы	200	±10
диффузионного эмиттера	2,5	±30
Отношение сопротивлений резисторов . .	R_1/R_2	±5
Коэффициент усиления по току β . . .	70	±50
Прямое падение напряжения диода, В	0,7	±3
Напряжение пробоя перехода, В:		
коллектор — подложка	80	±25
коллектор — база	45	±30
эмиттер — база . . .	6,7	±3
Напряжение насыщения коллектора при малом токе, В . . .	0,4	±25

Основные принципы интегральной технологии. Процесс производства ИС должен обладать высокой эффективностью, под которой следует понимать высокое качество (высокий процент выхода годных ИС) и низкую трудоемкость. Для обеспечения высокой эффективности производства необходимо соблюдение ряда принципов, которые учитывают при разработке структуры ИС и технологии ее получения.

Важнейшим является принцип технологической совместимости элементов ИС с наиболее сложным элементом, которым обычно является транзистор. Структура элементов (диодов, резисторов, конденсаторов) должна содержать только те области, на основе которых построен транзистор. Поэтому технологический процесс изготовления кристалла ИС строится с учетом лишь структуры транзистора, а остальные элементы формируются попутно.

Примером нарушения этого принципа является использование МДП-конденсатора в ИС с биполярными транзисторами (рис. 1.1), так как такой конденсатор требует выполнения ряда дополнительных операций, связанных с получением диэлектрика расчетной толщины. В то же время МДП-конденсатор технологически совмещается с униполярным транзистором в МДП ИС (см. § 1.7). В биполярных структурах в качестве конденсатора может быть использован обратно смещенный *p-n*-переход.

Таким образом, характер и последовательность операции обработки кристалла должны полностью определяться структурой транзистора.

Вторым принципом является принцип групповой обработки, которая должна охватывать как можно большее число операций. Возможность групповой обработки ИС обусловлена широким использованием физико-химических процессов (эпитаксия, диффузия, обезжиривание, травление, отмывка), в которых в качестве рабочей среды используют газообразные и жидкие вещества. Возможность одновременной обработки больших поверхностей позволяет также вести многоместную обработку нескольких групповых заготовок одновременно на ряде операций.

В результате одновременной обработки и получения нескольких тысяч ИС повышается воспроизводимость их характеристик и значительно снижается трудоемкость изготовления отдельной ИС.

На рис. 1.6 изображена групповая кремниевая пластина, на которой условно показаны границы отдельных ИС (кристаллов). На пластине диаметром 50 мм можно, например, изготовить 625 ИС размером 1×1 мм, или 400 размером $1{,}25\times1{,}25$ мм, или 275 размером $1{,}5\times1{,}5$ мм.

Имеется тенденция увеличения диаметра пластин, которая, однако, лимитируется технологическими трудно-

стями обеспечения равномерных свойств материала на большой площади.

Некоторые операции технологического процесса, например монтажно-сборочные операции, производятся над отдельными кристаллами индивидуально, т. е. после разделения пластины. Это значительно повышает трудоемкость операций и снижает экономичность процесса в целом. При разработке новых конструктивно-технологических вариантов ИС необходимо стремиться к расширению области групповой обработки. Например, ИС с контактными выступами и балочными выводами (см. § 1.7) позволяют применять групповую обработку и на монтажно-сборочных операциях, сужая соответственно область трудоемкой индивидуальной обработки.

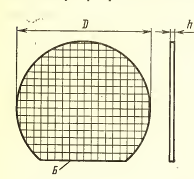


Рис. 1.6. Групповая пластина-заготовка:
D — диаметр пластины (40—60 мм); h — толщина пластины ($\sim 0{,}2$ мм); $Б$ — базовый срез

Важным принципом технологии ИС является принцип универсальности процессов обработки, заключающийся в том, что для производства различных по своим функциям ИС применяют идентичные по физической сущности процессы с одинаковыми технологическими режимами. Распространяя принцип технологической совместимости на различные типы ИС, в частности на функционально полную систему ИС, и применяя одинаковые режимы обработки, можно последовательно без переналадки процесса или даже одновременно изготавливать разные схемы. Единая базовая структура для схем различных типов порождает и единую *базовую технологию,* позволяющую одновременно производить микросхемы различных типов. Таким образом, в мелкосерийном и даже в единичном производстве возникает возможность использовать преимущества крупносерийного и массового производства.

Четвертый принцип — это принцип унификации пластин-заготовок, содержащих макси-

мальное число признаков микросхемы. Весь процесс производства ИС можно разделить на два этапа: заготовительный этап, в результате которого получают универсальную пластину-заготовку, и этап специальной (избирательной) обработки, в результате которой микросхема приобретает определенные функциональные свойства. Очевидно, что для универсальных пластин-заготовок экономически целесообразнее крупное централизованное производство. Поэтому область заготовительных процессов следует расширять, соответственно сужая область специальной обработки.

Наглядно иллюстрирует этот принцип сравнение двух модификаций эпитаксиально-планарной структуры: со скрытым n^+-слоем и без него. Во втором случае процесс эпитаксии может выполняться на заготовительном этапе и универсальная пластина-заготовка будет представлять собой двухслойную p-n-структуру. При введении в структуру скрытого n^+-слоя эпитаксии предшествуют избирательная обработка (фотолитография и диффузия n^+-слоя), поэтому эпитаксия должна выполняться на этапе специальной обработки, а заготовка имеет однородные свойства по всему объему (пластина p-типа).

Если пойти на определенную потерю площади кристалла, можно в пластине-заготовке сформировать изолированные области под элементы (с некоторой избыточностью) и, таким образом, специальную обработку ограничить лишь образованием базовых и эмиттерных областей и межсоединений.

Дальнейшее развитие этого принципа предполагает использование так называемого *базового кристалла* (пластины), представляющего собой заготовку, в которой сформирован универсальный набор элементов (с избыточностью). Специальная обработка заключается лишь в получении определенного рисунка межсоединений в соответствии с функциональными свойствами микросхемы данного типа.

Высокая чистота технологических сред, в которых осуществляется обработка, является общим требованием радиоэлектронного производства. В производстве же ИС это требование приобретает принципиальное значение, перерастая в п р и н ц и п в ы с о к о й ч и с т о т ы п р о ц е с с а в ц е л о м. На практике он означает использование материалов, практически не содержащих посторонних примесей, причем количество сознательно вводи-

Таблица 1.4

Требования к чистоте технологических газов, используемых в производстве ИС (по ОСТ 11.ПО.054.005)

Примесь	Содержание примесей, % об. (не более)			
	N	Ar	O	H
O_2	0,0005	0,0005	—	0,00001
H_2	0,001	0,001	0,001	—
H_2O	Точка росы −65° C			Точка росы −75° C

Примечание. Содержание пылевых частиц — не более 2—3 в 1 л газа при размере частиц не более 0,7 мкм.

мых примесей должно быть строго регламентировано. В табл. 1.4 приведены требования к чистоте газов, используемых в процессах эпитаксии, диффузии и пассивации. Столь жесткие требования обусловлены очень высокой чувствительностью монокристаллического кремния к инородным атомам и ионам, наличие которых влияет на его свойства и обусловливает неисправимый брак интегральных схем. Чем больше элементов содержит интегральная схема (чем выше степень интеграции), тем «чувствительнее» она к качеству выполнения операций, тем ниже процент выхода годных ИС.

Большое значение в связи с этим приобретают операции отмывки пластин, т. е. полное удаление следов реактивов, остающихся от предшествующей обработки. Применяемая при этом сверхчистая вода не должна оставлять на поверхности ионы растворенных в ней загрязнений, для чего вода предварительно подвергается процессу деионизации (обессоливанию).

Изложенное целиком относится и к заготовительному циклу обработки — очистке исходного материала, легированию и выращиванию монокристалла, резке слитка, шлифовке, полировке и пассивации пластин. Например, из-за недостаточно тщательной очистки поверхности перед пассивацией (окислением) кремния образуются дефекты в окисной пленке (поры, включения и т. п.), что приводит к браку в процессе фотолитографии и диффузии. Высокая плотность дефектов в окисной пленке и ис-

ходном кремнии затрудняет внедрение в производство БИС — схем с высокой степенью интеграции, в которых используют кристаллы большей площади, чем в обычных ИС (рис. 1.7).

Следует отметить, что недостаточная чистота процессов обработки не только приводит к браку в производстве, но и (что более опасно) к постепенным отказам микроэлектронной аппаратуры в процессе эксплуатации.

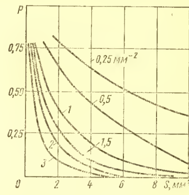


Рис. 1.7. Зависимость вероятности P выхода годных ИС от площади кристалла S и плотности дефектов в окисной пленке

Необходимая чистота процессов обработки и сборки обеспечивается также соответствующей чистотой окружающей рабочей атмосферы, под которой понимают прежде всего минимальную запыленность воздуха. В зависимости от допустимой запыленности производственные помещения делятся на пять классов (табл. 1.5).

В помещениях 3-го и 4-го классов чистоты выполняют резку слитков полупроводникового материала, исследуют физические свойства материала и надежность микросхем.

В помещениях 2-го класса чистоты осуществляют химическую обработку пластин, сборку микросхем, контроль электрических параметров, шлифовку и полировку пластин, изготовление фотооригиналов.

В помещениях 1-го класса выполняют наиболее ответственные операции: финишную очистку и отмывку пластин, фотолитографию, эпитаксиальное наращивание, диффузию примесей, вакуумное напыление.

Производственные помещения должны удовлетворять определенным требованиям с точки зрения их расположения, внутренней отделки, герметичности, правил поведения и формы одежды персонала.

Степень запыленности помещений (концентрацию пыли) определяют с помощью специальных приборов —

Таблица 1.5

Предельно допустимая запыленность атмосферы производственных помещений
(по ОСТ 11.ПО.050.001)

Класс чистоты атмосферы помещения или рабочего объема	Допустимое содержание частиц размером не более 0,5 мкм в 1 л воздуха
1	4
2	35
3	350
4	3500
5	По санитарным нормам (СН 245—71)

анализаторов запыленности. Принцип действия их основан на преобразовании световых вспышек, которые производят частицы пыли, проходящие через световой луч в затемненном объеме, в электрические импульсы.

Чистота окружающей среды проще и дешевле обеспечивается в ограниченном объеме, необходимом для выполнения той или иной операции. Поэтому ряд операций фотолитографии и сборки осуществляют в изолированных от окружающей среды устройствах — скафандрах. Необходимые манипуляции рабочий осуществляет с помощью резиновых перчаток, герметично вмонтированных в скафандр. За счет подачи внутрь скафандра специально очищенного обеспыленного воздуха создается избыточное давление, уменьшающее вероятность проникновения пыли извне в рабочий объем. Соединяя ряд скафандров герметичными каналами для передачи обрабатываемых изделий, создают технологические поточные линии (например, линии фотолитографии).

Очистку воздуха от пыли производят с помощью фильтров контактного действия различных конструкций, а также электрофильтров. Принцип действия последних основан на приобретении частицами заряда и последующем прилипании их к электродам.

Соответствующие требования предъявляются также к технологической таре для хранения и транспортировки полуфабрикатов.

Для повышения точности, стабильности и воспроизводимости технологических операций обработки и контроля большое значение имеет микроклимат производст-

венных помещений. Температура в помещении должна быть стабильной, а влажность воздуха — оптимальной. В отдельных случаях регламентируется также скорость движения воздуха в помещении.

По температурно-влажностным параметрам производственные помещения делятся на три класса.

В табл. 1.6 приведены требования к микроклимату производственных помещений.

Таблица 1.6

Требования к микроклимату производственных помещений (по ОСТ 11.ПО.050.001)

Класс помещений	Температура, °C		Относительная влажность, %
	зимой	летом	
1	21 ± 1	23 ± 1	45 ± 5
2	20 ± 2	23 ± 2	45 ± 15
3	По санитарным нормам (СН 245—71)		

Все перечисленные мероприятия, называемые *вакуумной гигиеной,* направлены на повышение технологической и эксплуатационной надежности микросхем.

§ 1.2. Диффузия

Физические основы процесса. Сущность диффузии (за исключением особых случаев) состоит во внедрении атомов легирующей примеси в кристаллическую решетку кремния и образовании области с противоположным типом электропроводности. Эта область ограничена *p-n*-переходом. Количество вводимой примеси должно быть достаточным для компенсации легирующей примеси в исходном материале и для создания избытка носителей противоположного типа электропроводности. Ввиду конечной (и очень малой) скорости диффузии концентрация введенной примеси убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, вглубь. Переход образуется на глубине $x_{пер}$, где концентрация введенной примеси оказывается равной концентрации исходной примеси $N_{исх}$ (рис. 1.8).

Диффузия примеси происходит и в тангенциальных направлениях (y, z). Поэтому боковые стенки p-n-перехода при термической диффузии всегда расположены под слоем окисла.

В качестве легирующих примесей для получения дырочной электропроводности можно использовать элементы-акцепторы B, In, Ga, Al, у которых недостает одного валентного электрона для создания ковалентной связи с атомом четырехвалентного кремния. Для получения электронной электропроводности можно использовать P, As, Sb, имеющие избыточный валентный электрон по сравнению с кремнием.

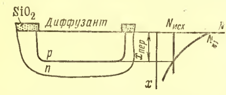


Рис. 1.8. Образование p-n-перехода в процессе диффузии: N_0 — концентрация вводимой p-примеси на поверхности кристалла

Проникновение примесных атомов в кристаллическую решетку кремния может происходить:

1) последовательным перемещением по вакантным узлам решетки с образованием твердого раствора замещения;

2) перемещением в междоузлиях с образованием твердого раствора внедрения;

3) за счет обмена местами в узлах кристаллической решетки с атомами кремния (раствор замещения).

Наиболее вероятный путь — первый, так как плотность вакансий в кристалле кремния может быть весьма высока (свыше 1%). При высокой температуре процесса вследствие испарения кремния на поверхности кристалла (если она не защищена) образуются вакансии, диффундирующие в глубь кристалла. Вероятность внедрения атомов примеси в междоузлия возрастает с повышением концентрации примеси, так как плотность вакансий при этом падает.

Третий путь наименее вероятен, так как требует значительно большей энергии активации, чем первые два.

Скорость процесса диффузии определяют с помощью коэффициента диффузии D, равного числу примесных атомов, проходящих через площадку в 1 см² за 1 с при градиенте концентрации атомов примеси, равном 1 см⁻⁴.

Связь коэффициента диффузии с температурой процесса описывается уравнением Аррениуса

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (1.1)$$

где $k = 8{,}63 \cdot 10^{-5}$ эВ/град — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура процесса, К; D_0 — кажущийся коэффициент диффузии, см²/с, который зависит от рода полупроводника и диффундирующей примеси, а также от кристаллографического направления. Для бора в кремнии он равен 14, для фосфора — 1500 (поверхность кристалла совпадает с плоскостью [111]); при $T \to \infty$, $D \to D_0$; E_a — энергия активации, эВ; характеризует энергию, необходимую для перехода атома примеси в соседний узел решетки; при диффузии бора и фосфора в бездефектный кремний E_a равна соответственно 3,7 и 4,4 эВ.

На рис. 1.9 дана зависимость коэффициента диффузии легирующих элементов в кремний от температуры. Как следует из рисунка, в диапазоне

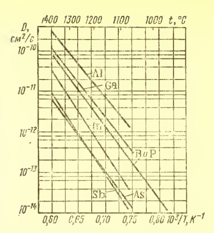


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента диффузии легирующих элементов в кремний от температуры

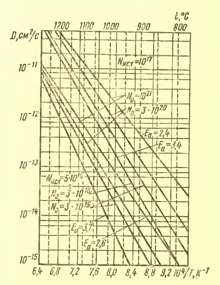


Рис. 1.10. Зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремний от температуры и концентрации исходной и диффундирующей примесей

рабочих температур (1100—1300° С) бор и фосфор имеют примерно одинаковое значение D. При $t=1200°$ С оно равно $4\cdot10^{-12}$ см²/с.

Точный расчет D по уравнению Аррениуса невозможен, так как оно не учитывает влияния вакансий и других дефектов решетки, а также влияния концентрации исходной и диффундирующей примесей.

При температуре диффузии оба типа примеси частично или полностью ионизированы, что приводит к возникновению ускоряющего электрического поля для примесных ионов, т. е. к увеличению коэффициента диффузии.

На рис. 1.10 показано влияние концентрации исходной ($N_{исх}$) и диффундирующей (N_0) примесей на коэффициент диффузии фосфора в кремний. Здесь же приведены действительные значения энергии активации, которые характеризуют тангенс угла наклона прямой согласно уравнению

$$\ln D=\ln D_0-\frac{E_а}{kT}.$$

Диффузионный профиль. Связь концентрации примеси с глубиной и временем диффузии описывается основным уравнением диффузии (второй закон Фика)

$$\frac{\partial N}{\partial t}=D\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \qquad (1.2)$$

где N — концентрация примеси, см$^{-3}$; x — глубина диффузии, см; t — время диффузии, с.

Закон распределения примеси по глубине (диффузионный профиль) зависит от условий проведения процесса.

В случае *неограниченного (постоянного) источника примеси* на поверхности пластины поддерживается постоянная концентрация примеси ($N_0=\text{const}$) и решение уравнения диффузии имеет вид

$$N=N_0\,\text{erfc}\,\frac{x}{2\sqrt{Dt}}=N_0\left[1-\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right], \qquad (1.3)$$

где символ erfc означает дополнение (до единицы) функции ошибок. Величину $2\sqrt{Dt}$, имеющую размерность длины, называют диффузионной длиной.

В выражении для дополнения функции ошибок

$$\text{erfc}\,y=\left[1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y e^{-y^2}dy\right]$$

имеется табличный интеграл

$$\int e^{-y^2}dy = y - \frac{y^3}{1!3} + \frac{y^5}{2!5} - \frac{y^7}{3!7} + \dots$$

$$\dots + (-1)^n \frac{y^{2n+1}}{n!\,(2n+1)} + \dots; \quad (n=0,\ 1,\ 2, \dots).$$

В данном случае $y = \dfrac{x}{2\sqrt{Dt}}$.

На рис. 1.11 представлен график erfc y.

Из выражения (1.3) следует, что заданное распределение примеси можно получить при различных сочетаниях значений D (т. е. температуры) и времени. Кроме того, величина температурно-временного воздействия (Dt) определяет при постоянной поверхностной концентрации количество примеси, введенное в кристалл, т. е. дозу легирования. Изложенное иллюстрируется рис. 1.12, *а*.

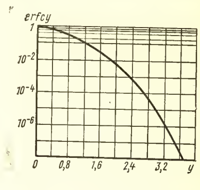


Рис. 1.11. График дополнения функции ошибок erfc

Дозу легирования Q, т. е. число атомов примеси, введенное в кристалл за время диффузии через площадку в 1 см^2, можно получить на основе первого закона Фика

$$J = -D\frac{\partial N}{\partial x}, \tag{1.4}$$

где J — плотность потока примесных атомов, проникающих через поверхность кристалла $(x=0)$ за секунду, см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$, $\partial N/\partial x$ — градиент концентрации примеси в направлении x, см$^{-4}$.

Подставляя вместо N его значение из (1.3), получим

$$J_{x=0} = -D\frac{\partial N}{\partial x}\Bigg|_{x=0} = \frac{DN_0}{\sqrt{\pi Dt}}\, e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2}\Bigg|_{x=0} = N_0\sqrt{\frac{D}{\pi t}}.$$

Интегрируя полученное выражение по времени, найдем

$$Q=\int_0^t Jdt=2N_0\sqrt{\frac{Dt}{\pi}}=1{,}13N_0\sqrt{Dt}. \qquad (1.5)$$

Выражение (1.3) хорошо описывает действительное примесное распределение для глубин диффузии не менее 1,5—2 мкм или для поверхностных концентраций, не превышающих 10^{20} см$^{-3}$. При введении примеси более высокой концентрации вакансии в тонком приповерхностном слое оказываются в основном заполнены атомами примеси, поэтому главным механизмом диффузии становится диффузия по междоузлиям. Обладая повышенной энергией ионизации, эти атомы в значительной степени нейтральны (при концентрациях примеси свыше $5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ ионизированными являются примерно половина атомов примеси). С глубиной концентрация примеси падает, плотность вакансий возрастает и заметно возрастает роль механизма диффузии по вакансиям, а концентрация ионизированной примеси существенно превышает концентрацию нейтральной. При концентрациях менее 10^{19} см$^{-3}$ вся диффундирующая примесь ионизирована и перемещается только по вакансиям. В соответствии с этим каждая из трех областей характеризуется собственным коэффициентом диффузии.

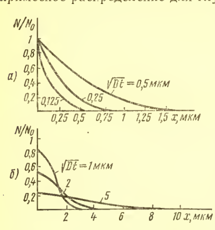


Рис. 1.12. Распределение диффундирующей примеси по глубине:

а — при неограниченном источнике примеси, *б* — при ограниченном поверхностном источнике примеси; N_0 — поверхностная концентрация примеси до разгонки

Таким образом, в поверхностном высоколегированном слое, полученном путем диффузии примеси из неограниченного источника, имеется значительное количество нейтральных атомов примеси, которые не создают по-

движных носителей. Вследствие этого истинная поверхностная концентрация выше той, которую можно обнаружить путем измерения дифференциальной электропроводности диффузионного слоя (см. далее). Соответственно, истинное значение коэффициента диффузии выше рассчитанного из выражения (1.3) при истинном измеренном значении глубины залегания перехода.

Расхождение экспериментальных и теоретических данных усложняет расчет структуры элементов ИС и технологических режимов диффузии, не позволяет заранее точно определить глубину залегания *p-n*-перехода и величины концентраций, при которых он образуется. Для получения точных результатов при расчетах необходимо реальное распределение аппроксимировать несколькими кривыми (например, тремя), отвечающими закону дополнения функции ошибок, но отличающимися коэффициентами диффузии.

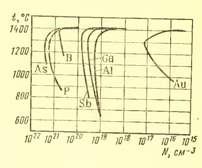


Рис. 1.13. График растворимости некоторых элементов в кремнии в твердой фазе

Диффузия из неограниченного источника является реальным случаем в производстве ИС и представляет собой первый этап диффузии, задачей которого является введение в кристалл определенного количества примеси. Для уменьшения температурного воздействия (уменьшения фактора Dt) поверхностную концентрацию выбирают максимально возможной, т. е. соответствующей предельной растворимости примеси при выбранной температуре диффузии (рис. 1.13). Для фосфора при 1000° С она составляет 10^{21} см$^{-3}$, что соответствует 2% (атомным). В результате образуется тонкий приповерхностный слой, насыщенный примесью. В производстве этот этап нередко называют з а г о н к о й   п р и м е с и.

Для окончательного формирования диффузионной области введенную на первом этапе примесь подвергают перераспределению. Этот второй этап диффузии, назы-

ваемый *разгонкой примеси*, соответствует диффузии из *ограниченного источника примеси.*

В этом случае примесь диффундирует из поверхностного слоя кремния вглубь, тогда как поступление примеси из окружающей среды отсутствует. При этом поверхностная концентрация N_0 с течением времени убывает (рис. 1.12, *б*).

Решением уравнения диффузии для этого случая является функция *распределения Гаусса*:

$$N = N_0(t)\, e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}\, e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2}, \qquad (1.6)$$

где Q — доза легирования, см$^{-2}$.

Данное выражение описывает истинное распределение тем точнее, чем тоньше слой, из которого происходит диффузия. Оно получено также в предположении, что поступление примеси в кристалл извне и испарение примеси из кристалла отсутствуют. Практически этап разгонки заключается в нагреве пластин в окислительной среде. Образующаяся окисная пленка предохраняет введенную примесь от испарения.

Следует иметь в виду, что последующие операции обработки ИС, связанные с нагревом (диффузии, окисления и т. п.), влекут за собой продолжение диффузии примеси. Поэтому в выражение для распределения Гаусса вместо Dt должна входить сумма $\sum_{1}^{n} D_i t_i$, где D_i — коэффициент диффузии примеси для температуры, при которой выполняется i-я операция; t_i — время выполнения i-ой операции; n — число операций, связанных с последующим нагревом пластины (включая рассматриваемый этап разгонки примеси).

Используя приведенные выражения распределения примесей, можно рассчитать режимы диффузии. Исходными данными являются параметры диффузионной области N_0 и $x_{пер}$, а также распределение исходной примеси в заготовке (в частности концентрация исходной примеси $N_{исх}$ на уровне перехода).

Алгоритм расчета сводится к следующему. Рассматривая выражение (1.6) при $x=0$ и $x=x_{пер}$, получим си-

стему уравнений:

$$N_0=\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}};\ N_{исх}=\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}\,e^{-\left(\frac{x_{пер}}{2\sqrt{Dt}}\right)^2}.$$

Отсюда находим

$$\frac{N_0}{N_{исх}}=e^{\frac{x_{пер}^2}{4Dt}}$$

и далее

$$Dt=\frac{x_{пер}^2}{4\ln\frac{N_0}{N_{исх}}}.$$

Задаваясь температурой разгонки в пределах 1000—1250° С, находим (рис. 1.9 и 1.10) коэффициент диффузии, а затем вычисляем время разгонки.

При известных D и t из первого уравнения системы определяем Q.

Далее, задаваясь температурой загонки в пределах 800—1000° С и принимая поверхностную концентрацию при загонке, равной пределу растворимости примеси или несколько меньшей (рис. 1.13), находим фактор Dt из (1.5) и далее время загонки. Во избежание жесткого контроля времени загонки его следует принимать не менее 20 мин, снижая соответственно температуру процесса.

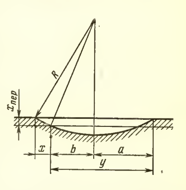


Рис. 1.14. Профиль сферического шлифа для определения глубины залегания *p-n*-перехода

Двухэтапный процесс диффузии позволяет улучшить воспроизводимость параметров диффузионных областей за счет корректировки процесса на втором этапе в зависимости от результатов первого этапа (например, за счет уточнения значения коэффициента диффузии). Результаты процесса необходимо оценивать также при отработке режимов диффузии с целью их оптимизации.

Контроль параметров диффузионных слоев. К параметрам диффузионного слоя относят глубину залегания

p-n-перехода $x_{пер}$, поверхностное сопротивление слоя $R_{сл}$, поверхностную концентрацию примеси N_0 и зависимость концентрации примеси от глубины.

Поскольку значения параметров не зависят от площади диффузии, измерять параметры можно на пластине-свидетеле, которую вводят в зону диффузии одновременно с пластинами-заготовками.

Измеряют $x_{пер}$ с помощью сферического шлифа, глубина которого должна превышать $x_{пер}$ (рис. 1.14). Из рис. 1.14 видно, что

$$x_{пер}=\sqrt{R^2-b^2}-\sqrt{R^2-a^2}=R\left(\sqrt{1-b^2/R^2}-\sqrt{1-a^2/R^2}\right).$$

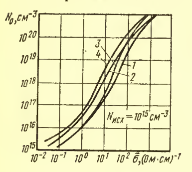
Так как радиус шлифа $R\gg a$, b, то

$$x_{пер}\approx R\left(1-\frac{1}{2}\cdot\frac{b^2}{R^2}-1+\frac{1}{2}\cdot\frac{a^2}{R^2}\right)=\frac{1}{2}\cdot\frac{a^2-b^2}{R}.$$

Поскольку $x=a-b$; $y=a+b$ и $a^2-b^2=xy$, окончательно

$$x_{пер}\approx xy/2R.$$

Величины x и y измеряют с помощью инструментального микроскопа. Для четкого выявления p-n-перехода (границ областей) применяют химическое окрашивание. Например, при обработке шлифа в растворе, состоящем из HF (20 весовых частей) и $CuSO_4$ (100 весовых частей), n-область покрывается медью. При обработке в плавиковой кислоте с добавкой 0,1% HNO_3 p-области темнеют. Погрешность определения



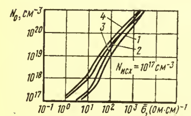


Рис. 1.15. Зависимость концентрации примеси на поверхности кремния от средней проводимости диффузионного слоя:
1 и 2 — соответственно для n- и p-примеси при гауссовом распределении; 3 и 4 — соответственно для n- и p-примеси при распределении по закону дополнения функции ошибок

$x_{пер}$ составляет около 2%. Например, для $x_{пер}=6$ мкм погрешность равна 0,1 мкм.

Глубину залегания *p-n*-перехода можно определить также с помощью плоского косого шлифа, выполненного под углом 1—2° к поверхности диффузионного слоя. Точность определения глубины при этом существенно зависит от точности ориентации пластины при шлифовке и при измерении на микроскопе.

Между поверхностной концентрацией N_0 и средней проводимостью слоя $\bar{\sigma}$ существует жесткая связь. Для ее определения необходимо знать закон распределения примеси и исходную концентрацию $N_{исх}$. На рис. 1.15 приведены графики, называемые кривыми Ирвина, которые позволяют определять концентрацию примеси на поверхности в зависимости от средней проводимости слоя:

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{R_{сл}x_{пер}}.$$

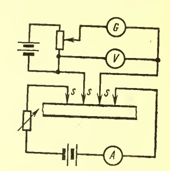


Рис. 1.16. Схема измерения поверхностного сопротивления четырехзондовым методом

Поверхностное сопротивление слоя $R_{сл}$ может быть измерено четырехзондовым методом по схеме рис. 1.16, позволяющей исключить влияние переходных сопротивлений на точность измерения. Значения напряжения U и тока I снимают после того, как потенциометром на гальванометре G установлен нуль. Поверхностное сопротивление слоя

$$R_{сл}=4{,}53\frac{U}{I}.$$

Формула справедлива при $s \gg x_{пер}$ и $D \gg s$. Обычно $s=1$ мм, диаметр пластин $D=40—60$ мм.

Используя четырехзондовый метод, можно построить график распределения концентрации примеси по глубине слоя. С этой целью измерения поверхностного сопротивления (проводимости) чередуют со снятием тонких поверхностных слоев кремния (анодное окисление и травление SiO_2) вплоть до дна *p-n*-перехода. Однако, как

Таблица 1.7

Характеристика некоторых диффузантов

Диффузант	Состояние при комнатной температуре	Температура источника, C°	Общая характеристика
Борный ангидрид B_2O_3	Твердое	600—1200	Загрязняет трубу, управление затруднено
Трибромид бора BBr_3	Жидкое	10—30	Не загрязняет трубу, легкое управление, но сильная зависимость от геометрии системы
Трихлорид бора BCl_3	Газообразное	Комнатная	То же, что у бромида
Диборан B_2H_6	Газообразное	Комнатная	То же, что у бромида, но высокая токсичность
Фосфорный ангидрид P_2O_5	Твердое	200—300	Чувствительность к присутствию паров воды, трудность получения низкой концентрации
Хлорокись фосфора $POCl_3$	Жидкое	2—40	Не загрязняет трубу, удовлетворительное управление, но сильная зависимость от геометрии системы
Трибромид фосфора PBr_3	Жидкое	170	То же, что у хлорокиси
Фосфин PH_3	Газообразное	Комнатная	То же, что у хлорокиси, точное регулирование, но токсичен

отмечалось, четырехзондовый метод регистрирует лишь ионизированную примесь.

При наличии нейтральной примеси истинный диффузионный профиль может быть найден путем замены четырехзондового метода методом радиоактивных изотопов. При исследовании распределения фосфора можно использовать изотоп P^{32} (с периодом полураспада $\sim$14,3 дня), получаемый путем нейтронного облучения исследуемого образца.

Технология и оборудование. Источником примеси в процессе диффузии является соединение, содержащее

легирующий элемент и называемое диффузантом. В зависимости от состояния при нормальной температуре различают твердые, жидкие и газообразные диффузанты. В табл. 1.7 приведены характеристики наиболее распространенных диффузантов. В зону диффузии, где располагают кремниевые пластины-заготовки, диффузант вводят в газообразном или парообразном состоянии. Поэтому источники твердых и жидких диффузантов должны содержать регулируемый нагреватель для создания нужного давления пара.

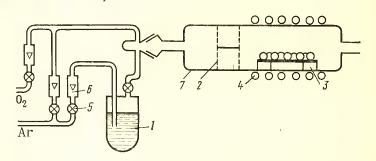


Рис. 1.17. Схема однозонной диффузионной печи:
1 — источник жидкого диффузанта; *2* — газосмесительная камера; *3* — кварцевая лодочка с заготовками; *4* — нагреватель; *5* — кран; *6* — ротаметр; *7* — кварцевая труба

Общим недостатком твердых диффузантов является трудность регулирования давления паров и, как следствие, пониженная воспроизводимость результатов. Кроме того, они требуют высокой температуры источника, что усложняет и удорожает оборудование (двухзонные диффузионные печи). Широкое распространение получили жидкие диффузанты, обладающие высокой упругостью пара при невысоких температурах. Это позволило вынести источник из высокотемпературной зоны (кварцевой трубы печи) и применить более простые однозонные печи. Для транспортировки паров диффузанта в зону диффузии используют аргон, азот и другие газы, не взаимодействующие с кремнием и практически не диффундирующие в него.

На рис. 1.17 представлена схема однозонной диффузионной печи с источником жидкого диффузанта. Зона диффузии располагается в длинной кварцевой трубе, снабженной нагревателем.

При групповой загрузке пластин нагревательная система должна обеспечивать температуру до 1250° С с точностью порядка ±0,5° С на длине 40—60 см. С этой целью нагреватель выполняют в виде отдельных секций, снабженных индивидуальными устройствами контроля и регулирования температуры. Заготовки располагают в кварцевой лодочке параллельно или перпендикулярно газовому потоку. Геометрия системы (лодочка, расположение заготовок, газосмеситель) должна обеспечить однородность состава и ламинарность потока.

Для насыщения парами диффузанта транспортирующий газ пропускают либо над поверхностью диффузанта, либо через диффузант в зависимости от требуемой концентрации. При постоянном расходе газа концентрация диффузанта в нем регулируется температурой источника. Для окисления поверхности кремния предусмотрена подача кислорода в смеси с транспортирующим газом.

В последнее время наметился переход к газообразным диффузантам, регулирование концентрации которых достигается более простыми средствами. Источником в этом случае служит баллон со сжатым газом (диборан, фосфин); результаты диффузии характеризуются высокой воспроизводимостью.

Диффузионные печи могут быть использованы и для других высокотемпературных процессов, связанных с повышенными требованиями к температурным параметрам (например, окисления кремниевых пластин, вжигания контактов).

Сложность и высокая стоимость диффузионных печей при ограниченной загрузке пластинами обусловливают необходимость применения в серийном производстве ИС многотрубных печей, в которых кварцевые трубы располагают параллельно друг другу.

Технические характеристики диффузиониой одиозонной печи СДО-125/4-А

Количество технологических труб	4 шт.
Диапазон рабочих температур	500—1250° С
Нагреватель	проволочная спнраль из сплава ЭИ-626
Диаметр рабочей трубы . . .	60 мм
Миинимальиая длина рабочей зоны	400 мм
Равномерность распределения температуры в рабочей зоне	±1° С

Точность поддержания температурного уровня в пределах рабочей зоны	$\pm$0,5° С
Воспроизводимость температурного уровня	$\pm$1° С
Время выхода печи на максимальную рабочую температуру	3 ч
Максимальная мощность, потребляемая в установившемся режиме	17 кВА
Охлаждение	естественное
Габаритные размеры	1400×750×1750 мм
Масса	800 кг

Для обеспечения этих температурных характеристик в помещении, где эксплуатируются диффузионные печи, должен быть создан микроклимат, атмосферное давление 750$\pm$30 мм рт. ст., скорость движения воздуха не более 0,5 м/с.

Весьма важную роль в диффузионном процессе играет окисляющая среда. Растущая в процессе диффузии примеси окисная пленка SiO_2 предохраняет поверхность кремния от эрозии (из-за испарения) и нежелательных химических реакций и поэтому, как показывает практика, заметно повышает воспроизводимость диффузии.

Кроме того, окисная пленка в этом процессе становится локальным источником, из которого осуществляется диффузия атомов примеси в кремний. Например, при использовании в качестве внешнего источника фосфина и в присутствии кислорода в атмосфере трубы происходят следующие реакции:

$$PH_3 \rightarrow H_2 + P$$

$$P + O_2 \rightarrow P_2O_5$$

На поверхности кремния происходит реакция $P_2O_5 + Si \rightarrow SiO_2 + P$. По мере роста окисной пленки фосфорный ангидрид диффундирует к границе раздела SiO_2—Si и выделяется в виде атомарного фосфора. Аналогичные реакции и явления протекают и при диффузии бора. Таким образом, в процессе диффузии окисная пленка представляет собой смесь окиси кремния и окисла P_2O_5 или B_2O_3, т. е. фосфоросиликатное или боросиликатное стекло. Это локальный источник примеси должен быть удален путем стравливания перед процессом разгонки.

Параметрами процесса загонки являются концентрации диффузанта и кислорода в газе-носителе, скорость

газовой смеси, температура в зоне диффузии, время процесса.

С увеличением температуры и времени загонки доза легирования Q возрастает (поверхностное сопротивление падает).

Увеличение содержания кислорода в газе-носителе увеличивает дозу легирования лишь до определенного предела, который соответствует полному разложению диффузанта. Поверхностная концентрация N_0 (концентрация диффузанта) поддерживается на уровне предела растворимости.

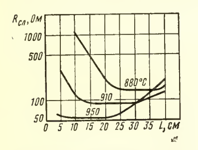


Рис. 1.18. Изменение удельного поверхностного сопротивления $R_{сл}$ вдоль зоны диффузии при различных температурах загонки ($R_{сл}$ измерялось после разгонки примеси при 1220° С)

Сложной задачей является обеспечение одинаковой дозы легирования в партии одновременно обрабатываемых пластин и даже в пределах одной пластины. В зоне диффузии существует участок, обеспечивающий равномерную дозу легирования (поверхностное сопротивление) вдоль трубы. Величина и положение этого участка зависят от скорости реакции диффузанта с кислородом и от скорости потока газовой смеси. Увеличение скорости реакции происходит с ростом концентрации реагентов в газе-носителе и температуры. Оба эти фактора обусловливают более раннее образование B_2O_3 (или P_2O_5) и, следовательно, сдвиг плоского участка ко входу трубы (рис. 1.18). Увеличение скорости потока газовой смеси приводит к запаздыванию реакции и смещению этого участка к выходу трубы.

На воспроизводимость свойств диффузионных областей в пределах одной пластины существенно влияет расстояние между пластинами. Оптимальный шаг расположения пластин 4—6 мм. При меньших значениях газ не переносит пары диффузанта к центру пластин, что значительно ухудшает равномерность концентрации. При бо́льших значениях уменьшается загрузка.

Чистые стенки кварцевой трубы способны поглощать диффузант, обедняя рабочую смесь. Для повышения

воспроизводимости диффузию проводят в трубе, предварительно насыщенной диффузантом до предела. В каждой диффузионной печи выполняют только одну и ту же операцию диффузии (например, только загонку фосфора).

Процесс разгонки примеси выполняют в диффузионной печи при отсутствии внешнего источника примеси. Рабочей атмосферой здесь служит смесь инертного газа-носителя с кислородом, т. е. разгонка примеси в глубь пластины сопровождается выращиванием защитной окисной пленки кремния.

Особые случаи диффузии. Как указывалось, электрическое контактирование диффузионных областей ИС с межсоединениями достигается нанесением алюминиевой пленки на участки пластины, освобожденные от окисной пленки с помощью фотолитографии. После вакуумного напыления Al и получения межсоединений производят вжигание контактов — отжиг при температуре порядка 550° С, в результате чего алюминий диффундирует в поверхностный слой кремния. Отмечалось также, что алюминий в кремнии ведет себя как акцептор, создавая дырочную электропроводность. Следовательно, вжигание может различным образом отразиться на качестве контакта в зависимости от типа электропроводности диффузионной области и соотношения концентрации исходной примеси и внедренного алюминия.

При вжигании алюминия в *p*-область тип электропроводности в поверхностном слое не изменяется и контакт получается омическим. При вжигании алюминия в *n*-область могут иметь место два случая. Если исходная донорная концентрация $N_{д} > N_{Al}$, то образуется омический контакт, так как изменение типа электропроводности не происходит. Если $N_{д} < N_{Al}$, то в поверхностном слое происходит изменение типа электропроводности (с электронной на дырочную) и образуется паразитный *p-n*-переход, а контакт становится выпрямляющим.

Предельная растворимость алюминия в кремнии при температуре вжигания $N_{Al} = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Концентрация донорной примеси в коллекторе транзистора типа *n-p-n* обычно в пределах 10^{16}—10^{17} см$^{-3}$, а в эмиттере 10^{21} см$^{-3}$. Следовательно, опасность выпрямляющего контакта возникает в коллекторной области.

Во избежание этого в область будущего контакта с коллектором проводят дополнительно диффузию донор-

ной примеси, с тем чтобы заведомо подавить концентрацию алюминия при последующем его вжигании. Практически удобнее и целесообразнее проводить диффузию под контакты одновременно с эмиттерной диффузией.

В быстродействующих переключательных транзисторах, работающих в режиме насыщения, заряд, накапливающийся в коллекторе в период прямой электропроводности, вызывает ток и в закрытом состоянии. Для уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда и повышения скорости переключения, в коллектор вводят золото, которое создает дополнительные центры рекомбинации. С помощью диффузии золота можно устанавливать время жизни в широких пределах (от наносекунд до микросекунд).

Технология легирования кремния золотом определяется следующими особенностями диффузии золота.

Движение атомов золота в кристаллической решетке кремния происходит в основном по междоузлиям, причем скорость этой диффузии на несколько порядков выше, чем у бора и фосфора. При 1200° С $D_{Au}=10^{-7}$ см²/с. Поэтому диффузия золота должна быть последней из операций, связанных с сильным нагревом.

Растворимость золота в твердой фазе сильно зависит от температуры (см. рис. 1.13). При температуре 1150° С она составляет $5\cdot10^{16}$ $см^{-3}$, а при 1050° С — уже $2\cdot10^{16}$ $см^{-3}$, т. е. падает более чем в 2 раза. При достаточно медленном охлаждении пластины кремния, легированной золотом, концентрация золота будет падать; излишек золота либо диффундирует из кристалла наружу, либо осаждается в виде сгустков, распределенных по объему и являющихся электрически пассивными. Во избежание этого охлаждение должно быть достаточно резким, чтобы сохранить высокую концентрацию золота.

Источником золота при диффузии является пленка, нанесенная непосредственно на незащищенные участки кремния. Вследствие химической инертности золота использование его в соединениях-диффузантах затруднено.

Для осуществления диффузии золота методом фотолитографии в слое окисла подготавливают окна. Затем методом вакуумного напыления наносят пленку золота (500—1000 Å). С помощью фотолитографии удаляют золото, лежащее поверх окиси кремния. Нагрев пластин осуществляют при температуре 700—900° С в течение 15—20 мин в потоке инертного газа. Охлаждение пластин

производят на массивных алюминиевых листах при комнатной температуре.

За время диффузии золото успевает продиффундировать по всему объему пластины, отрицательно влияя, однако, на время жизни носителей заряда в базе.

Ионное легирование. Поскольку в процессе изготовления ИС диффузию примеси осуществляют многократно, каждый последующий диффузионный нагрев вызывает продолжение диффузии примеси, введенной на предыдущем этапе. Это ухудшает воспроизводимость параметров ИС, так как изменяется диффузионный профиль структуры. По этой же причине получить базу толщиной менее 1 мкм очень сложно. В ряде случаев (производство ИС на МДП-структурах) боковая диффузия под окисел, характерная для термической диффузии, является нежелательной.

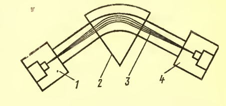


Рис. 1.19. Простейшая схема ионно-лучевого ускорителя

В значительной мере свободно от этих недостатков ионное легирование (имплантация). Сущность ионного легирования заключается в облучении через маску поверхности кремния потоком ионов легирующего элемента, предварительно подвергнутого тщательной очистке с помощью магнитной сепарации.

Ионное легирование осуществляют на ионно-лучевом ускорителе (рис. 1.19), который состоит из ионного источника *1*, электромагнитного сепаратора *2* (анализатора) и приемного устройства *4*, в котором устанавливают обрабатываемую полупроводниковую пластину. Пары рабочего вещества (легирующей примеси) поступают в газоразрядную камеру, где происходит их ионизация. Система электродов формирует ионный пучок *3*, который всегда содержит также и ионы посторонних примесей. В камере сепаратора ионы движутся в постоянном однородном магнитном поле (перпендикулярном плоскости чертежа). Возникающая при этом сила Лоренца искривляет траекторию движения ионов по радиусу, величина которого пропорциональна отношению массы частицы к ее заряду, а также скорости движения частицы. Таким

образом, в приемное устройство *4* поступает однородный по составу моноэнергетический пучок ионов, который и облучает полупроводниковую пластину.

Глубина внедрения ионов зависит от энергии ионного пучка E (рис. 1.20):

$$E = qnU,$$

где q — заряд электрона; n — кратность ионизации; U — ускоряющее напряжение.

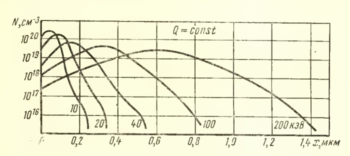


Рис. 1.20. Профили распределения электрически активных атомов бора в результате ионного легирования при различных энергиях ионного пучка

Отечественный ионно-лучевой ускоритель «Везувий» позволяет формировать пучки с энергией до 200 кэВ, обеспечивая точность легирования по глубине 0,02 мкм.

Количество введенной примеси определяется дозой облучения $Q = Jt$ Кл/см² или $Q = Jt/q$ ион/см², где J — плотность тока ионного пучка (выбирается в пределах 10^{-7}—10^{-4} А/см²); t — время облучения. Дозы облучения для базовых и эмиттерных областей лежат в пределах 10^{13}—10^{16} см$^{-2}$. Следовательно, время облучения может составлять несколько десятков секунд.

Процесс ионного легирования ведется при нормальной температуре (хотя вследствие торможения ионов в решетке кристалла температура поверхности может достигать 100° С). Это позволяет существенно расширить номенклатуру материалов, используемых в качестве основания микросхем и примесей. Так ионное легирование можно осуществлять в материалы, не допускающие высокотемпературной обработки (например, арсенид индия InAs) или требующие слишком высоких температур диф-

фузии (например, карбид кремния SiC), а также использовать примеси с малым коэффициентом диффузии или растворения.

Основным недостатком ионного легирования являются дефекты кристаллической решетки, возникающие в результате ее разупорядоченности при столкновениях ионов с узлами решетки.

Проникая в кристаллическую решетку, ион при соударении смещает атом решетки в междуузлия с образованием вакансии. Смещенный атом при движении образует каскад смещений, создавая разупорядоченные зоны размером 50—100 Å. По мере внедрения ионов идет накопление таких зон и при больших дозах легирования образуется аморфный слой.

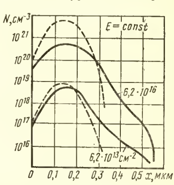


Рис. 1.21. Профили распределения электрически активных атомов бора при различных дозах ионного легирования

Если внедренный ион после торможения замещает вакантный узел, то он становится донором (или акцептором). Однако вероятность такого замещения мала и большинство внедренных ионов оказываются электрически пассивными. Для перевода их в активное состояние и восстановления кристаллической структуры необходим отжиг при температурах 600—1000° С. Внедренные и смещенные атомы при этом приобретают подвижность, достаточную для перехода в вакантные узлы и упорядочения структуры.

На рис. 1.21 представлены профили распределения электрически активных атомов бора в случае большой и малой дозы легирования и соответствующие им теоретические профили (при полной активности всех внедренных ионов). Из рисунка следует, что степень активности примеси уменьшается с увеличением дозы легирования, так как дефектность кристалла при этом возрастает.

Положения максимума концентрации внедренных атомов примеси на рис. 1.20 и 1.21 определяются средним нормальным пробегом ионов в кристалле. Однако при

определенной ориентации кристалла относительно направления ионного пучка пробеги ионов становятся аномально большими. Если траектория движения иона совпадает с кристаллографическими направлениями <110>, <100>, <111>, то ион проходит вдоль атомных рядов или плоскостей, образующих межосевые или межплоскостные каналы, испытывая только скользящие столкновения. Указанный эффект, называемый эффектом каналирования, полезен тем, что позволяет осуществлять ионное внедрение на заданную глубину при более низких энергиях и с малой степенью разупорядоченности структуры. Однако для того, чтобы основная масса ионов каналировалась, необходимо ориентировать подложку относительно ионного пучка с точностью 0,1°, что в производственных условиях весьма сложно. Для получения воспроизводимых результатов эффект каналирования подавляют, для чего увеличивают угол разориентации до 7—8°.

Оптимальный диапазон температуры отжига для фосфора составляет 600—800° С, для бора 800—1000° С. Более высокая температура для бора обусловлена пониженной растворимостью бора в кремнии по сравнению с фосфором. При внедрении бора в кремний образуются области пересыщения, которые могут быть устранены лишь при достаточной подвижности атомов бора. Следует подчеркнуть, что отжиг пластин после легирования не приводит к полной активности введенной примеси. Лишь при малых дозах легирования степень активности после отжига приближается к полной.

Для локального (избирательного) внедрения ионов используют маски на основе тонких «замедляющих» пленок, в которых средняя длина пробега ионов при данной энергии достаточно мала, чтобы «пронизать» защитную пленку. Средние пробеги ионов при энергиях 150 и 40 кэВ для пленки SiO_2 составляют 0,4 и 0,14 мкм соответственно, а для пленки Si_3N_4 — 0,3 и 0,1 мкм соответственно. Нитрид кремния характеризуется более высокой плотностью упаковки атомов, чем двуокись кремния. При высоких энергиях более эффективная защита может быть получена с помощью металлических пленок. Например, при энергии ионов 40 кэВ средняя длина пробега ионов в пленках Ni и Bi составляет всего 0,06 мкм. При малой толщине пленки и большой величине пробега ионов пленка становится прозрачной для потока ионов.

Локальное внедрение ионов может быть осуществлено и без защитной маски узкосфокусированным ионным лучом, управляемым по заданной программе.

Возможность очень точного дозирования количества примеси и глубины залегания *p-n*-перехода позволила получить транзисторы с толщиной базы (под эмиттером) 0,1 мкм, что повысило частотный предел до 15 ГГц.

Вторым важным преимуществом ионного легирования является точное соответствие размеров легированной области размерам окна в маске (отсутствие бокового внедрения примеси под маску). Это свойство ионного легирования эффективно используют в производстве ИС на МДП-структурах (рис. 1.22). Для МДП-транзистора оптимальные характеристики достигаются при точном совпадении длины канала и затвора, однако погрешности фотолитографии и боковая диффузия примеси при обычной технологии исключают эту возможность. В зависимости от энергии ионов, защитного материала и его толщины ионное легирование можно проводить и через защитный слой.

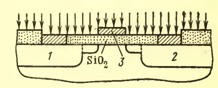


Рис. 1.22. Калибровка длины канала МДП-транзистора с помощью ионного легирования:
1 — исток; *2* — сток; *3* — затвор

В представленной структуре ионное легирование участков канала проводилось после получения областей истока и стока, диэлектрической пленки, контактов к истоку и стоку и затвора. Прозрачными для ионного пучка являются области по обе стороны от затвора за исключением толстого окисла. В результате облучения ионным пучком области истока и стока продлены, а длина канала точно откалибрована по длине затвора.

Ионное легирование характеризуется высокой стоимостью ионно-лучевых установок и их эксплуатации, а также ограниченной площадью обработки, связанной с трудностью получения широких пучков с высокой поперечной равномерностью. Для обработки больших площадей прибегают к перемещению пластин относительно ионного пучка.

В настоящее время ионное легирование используют в основном на этапе загонки (точное дозирование при-

меси) в сочетании с термической диффузией на этапе разгонки примесей.

§ 1.3. Эпитаксия

Физические основы процесса. Эпитаксия (от греческих «эпи» — на, «таксис» — располагать в порядке) — это процесс осаждения атомарного кремния на монокристаллическую кремниевую подложку, при котором полученная пленка является продолжением структуры основания. Практическое значение имеют осаждение легированной эпитаксиальной пленки на легированном основании. При различных типах электропроводности на границе пленки и основания возникает *p-n*-переход. В эпитаксиально-планарной структуре тонкая эпитаксиальная пленка толщиной 2—25 мкм содержит элементы ИС, а основание толщиной около 200 мкм играет чисто конструкционную роль. В отличие от диффузии примесей в основание, позволяющей получать области только с более высокой концентрацией примесей, эпитаксия дает возможность получать слои с широким диапазоном удельных сопротивлений, не зависящих от сопротивления основания.

Условия, обеспечивающие наивыгоднейшее (ориентированное) положение атома в кристаллической решетке, соответствующее минимуму свободной энергии, сводятся к следующему:

1) подложка должна иметь максимально возможную температуру, способствующую высокой подвижности (миграции) атомов на ее поверхности;

2) процесс должен исключать возможность осаждения агломератов (двойных и тройных объединений атомов), а поэтому выделение атомарного кремния должно происходить непосредственно на поверхности подложки;

3) поверхность монокристаллической подложки должна быть бездефектной, что достигается тщательной механической обработкой (шлифовкой, полировкой) с последующим травлением и отмывкой.

С помощью прямого процесса — напыления в вакууме — практически невозможно обеспечить первые два условия, а также осуществить точное дозирование примеси в пленке. Поэтому используют различные реакции газообразных веществ, происходящие на поверхности подложки (гетерогенные реакции) при давлении, близком к атмосферному.

Химические основы процесса. Для выделения кремния из его соединений используют два типа реакций: восстановление и пиролитическое разложение.

Для восстановления применяют тетрахлорид кремния $SiCl_4$, тетрабромид кремния $SiBr_4$, трихлорсилан $SiHCl_3$, дихлорсилан SiH_2Cl_2 и т. п.:

$$SiCl_4 + H_2 \underset{1200-1300^\circ C}{\rightarrow} Si\downarrow + HCl$$

$$SiBr_4 + H_2 \underset{1050^\circ C}{\rightarrow} Si\downarrow + HBr$$

Для пиролитического разложения применяют силан SiH_4:

$$SiH_4 \underset{1000^\circ C}{\rightarrow} Si\downarrow + H_2$$

Особенностью силана является его способность воспламеняться на воздухе. Поэтому силан необходимо хранить в баллоне и вводить в реактор сильно разбавленный водородом, а реактор тщательно очищать от следов кислорода и влаги (например, с помощью вакуумного насоса). Наличие водорода предохраняет силан также от разложения в газовой фазе, что обеспечивает гетерогенный характер реакции и улучшает качество эпитаксиальной пленки.

Одновременно с осаждением кремния осуществляют осаждение примеси, для чего используют BCl_3, BBr_3, PCl_3 (в реакциях восстановления), а также диборан B_2H_6 и фосфин PH_3 (в реакциях пиролитического разложения):

$$BBr_3 + H_2 \rightarrow B\downarrow + HBr$$

$$PCl_3 + H_2 \rightarrow P\downarrow + HCl$$

$$B_2H_6 \rightarrow B\downarrow + H_2$$

$$PH_3 \rightarrow P\downarrow + H_2$$

Легирование растущей пленки достигается за счет подачи в реактор газообразной смеси вещества, содержащего кремний, и лигатуры (примесесодержащего вещества). Соотношение компонентов смеси должно обеспечивать заданную концентрацию примеси в эпитаксиальной пленке.

Технология и оборудование. Гетерогенную реакцию, протекающую на границе газообразной и твердой фаз, можно условно представить в виде следующих стадий:

1) перенос веществ, участвующих в реакции, к поверхности подложки;

2) адсорбция реагирующих веществ;

3) реакции, происходящие на поверхности;

4) десорбция молекул побочных продуктов;

5) перенос побочных продуктов в основной поток газа;

6) ориентация атомов в узлах кристаллической решетки.

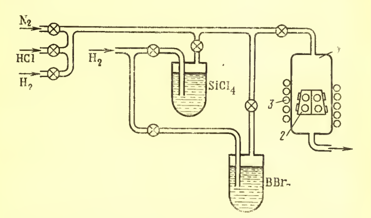


Рис. 1.23. Схема установки для эпитаксиального наращивания с вертикальным реактором и раздельными испарителями

На рис. 1.23 представлена схема установки с вертикальным реактором для эпитаксиального наращивания пленок. В этом случае используются реакции восстановления, а источники кремния ($SiCl_4$) и примеси (BBr_4) — жидкие. Пластины-заготовки кремния *n*-типа с тщательно очищенной поверхностью устанавливают на пирамидальном графитовом держателе *2*, имеющем кварцевую или какую-либо другую пассивную оболочку (например, из карбида кремния SiC). Держатель с пластинами вводят в реактор из кварца *1*, снабженный высокочастотным индуктором *3*. В начале цикла для вытеснения воздуха в реактор *1* подается азот (или другой инертный газ). После «промывки» системы и прекращения подачи азота в реактор подается водород. Одновременно включают индуктор для нагрева держателя с подложками до рабочей температуры процесса (1200° С). В присутствии водорода при высокой температуре происходит восстановление окисла, следы которого присутствуют на поверхно-

сти кремния. Далее осуществляется газовое травление — впуск хлористого водорода, в результате чего поверхность подложек стравливается на 2—3 мкм, освобождаясь тем самым от следов разрушенной структуры.

Содержание HCl в H_2 составляет 1—2%, при этом скорость травления порядка 0,5 мкм/мин. Примеси из стравленного слоя подложки могут оседать на стенках реактора и при последующем высаживании пленки кремния загрязнять ее (явление автолегирования).

Собственно наращивание начинается во время подачи в реактор из соответствующих испарителей смеси H_2 и $SiCl_4$ и смеси H_2 и BBr_4. Скорость роста пленки составляет от десятых долей до нескольких микрометров в минуту.

При достижении заданной толщины пленки (контроль по времени) подачу рабочей смеси прекращают, нагреватель выключают и через реактор пропускают азот для удаления продуктов реакции и охлаждения пластин.

Для получения смеси заданного состава (в соответствии с требуемой концентрацией примеси в пленке) в установке предусмотрены раздельные испарители для $SiCl_4$ и BBr_4. Меняя температуру на испарителях, изменяют давление пара вещества и содержание его в рабочей смеси.

Такая система не является достаточно совершенной, так как для подачи лигатуры, концентрация которой в газовой фазе должна быть очень низкой, требуется глубокое охлаждение испарителя.

Другой способ введения смеси — из общего испарителя, содержащего смесь жидких веществ,— пригоден лишь тогда, когда упругость паров компонентов смеси практически одинакова. В рассмотренном случае BBr_4 имеет более низкую упругость, чем $SiCl_4$ (рис. 1.24), что приводит к постепенному обогащению смеси примесью и постепенному повышению концентрации примеси в эпитаксиальных пленках.

Практически, чтобы осуществить этот способ, возможен один из следующих приемов:

1) использовать небольшую часть смеси, не доводя ее до заметного обогащения примесью;

2) ввести дополнительный источник $SiCl_4$, компенсирующий изменение состава смеси;

3) вводить в испаритель небольшие дозы смеси и испарять их полностью (принцип микродозирования).

Последний путь реализован в некоторых типах установок.

Наиболее прогрессивным является использование газообразных примесных источников (PH_3, B_2H_6). Газообразные источники обеспечивают более высокую воспроиз-

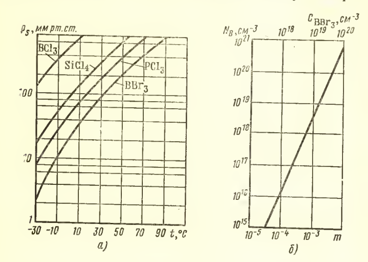


Рис. 1.24. Зависимости:

а — упругости пара p_s некоторых веществ от температуры; *б* — концентрации бора N_B в пленке от объемного соотношения BBr_3 и $SiCl_4$ в жидкой смеси m и от концентрации в газовой фазе C_{BBr_3} при использовании общего источника

водимость параметров пленки, так как они поступают из баллонов при постоянном давлении. Особенно эффективно их использование в сочетании с силаном в реакциях разложения.

Технические характеристики установки наращивания эпитаксиальных слоев УНЭС-2П-В с двумя вертикальными реакционными камерами

Количество подложек Ø 40 мм, одновременно обрабатываемых в одной реакционной камере	14 шт.
Скорость потока обеспыленного воздуха при загрузке подложек	не менее 0,3 м/с
Метод нагрева подложек . . .	индукционный
Диапазон рабочих температур подложкодержателя	1100—1300° С

Точность поддержания температуры подложкодержателя	±5° C
Количество испарителей . . .	3 шт.
Диапазон рабочих температур в испарителях	15—60° C
Точность поддержания температуры испарителей . . .	±1° C
Давление рабочих газов (H_2, Ar, HCl) на входе в установку	2—3,5 ат
Давление рабочих газов после регуляторов давления	500—3000 мм вод. ст.
Производительность вытяжной вентиляции	1000 м³/ч
Режим работы установки . . .	ручной и автоматический
Число программируемых операций технологического процесса	8
Время одной программируемой операции	1—99 мин
Точность программирования времени	±2%
Максимальная потребляемая мощность	60 кВт
Габаритные размеры, мм:	
рабочего агрегата	3220×1000×2000
ВЧ генератора	1300×1312×1880
скруббера улавливания и дожигания газов	720×460×1430
Масса, кг:	
рабочего агрегата	744
генератора ВЧ	1300
скруббера	44,3

Процесс наращивания в установке УНЭС-2П-В основан на реакциях восстановления.

Влияние технологических факторов на параметры эпитаксиального слоя. Совершенство структуры эпитаксиального слоя оценивают путем измерения подвижности носителей. Кроме того, равномерно легированный эпитаксиальный слой характеризуется толщиной и удельным объемным сопротивлением ρ.

Толщина слоя зависит от скорости и времени осаждения. Скорость осаждения определяется скоростью реакции выделения кремния, которая в свою очередь зависит от концентрации $SiCl_4$ в H_2, скорости потока рабочей смеси и температуры подложек. Все три указанных фактора контролируются достаточно точно, что позволяет поддерживать скорость осаждения неизменной и конт-

ролировать толщину пленки по времени осаждения. Разброс по толщине слоя в пределах нескольких партий составляет ±5%.

С повышением концентрации $SiCl_4$ в рабочей смеси скорость осаждения возрастает. Однако с превышением некоторого критического (при данных условиях) значения концентрации пленка получается поликристаллической, что свидетельствует о выделении кремния в газовой фазе, осаждении агломератов и снижении миграционной подвижности атомов на подложке. Практически используемые скорости осаждения не превышают 2,5 мкм/мин.

В области достаточно высоких температур (1150—1300° С) повышение скорости потока повышает скорость реакции (осаждения) до максимальной (при данной температуре), т. е. в этой области скорость реакции ограничена скоростью потока. При низких температурах («кинетическая область»), где скорость реакции ограничена температурой, с увеличением скорости потока скорость реакции не увеличивается, а с увеличением температуры увеличивается.

Однако в кинетической области скорость потока должна лежать в некотором оптимальном диапазоне, при отклонении от которого наблюдается систематическое изменение толщины пленки по направлению потока: при больших скоростях увеличение толщины (сдвиг максимума скорости реакции к выходу из реактора), при малых — уменьшение (сдвиг максимума ко входу в реактор).

Удельное сопротивление эпитаксиальной пленки зависит от концентрации лигатуры в рабочей смеси, скорости осаждения и температуры пластин. Влияние перечисленных факторов можно объяснить на основе явления сегрегации примеси.

Применительно к процессам эпитаксии явление сегрегации сводится к различной растворимости примеси в газовой фазе (рабочей смеси) и твердой фазе (слое кремния) и физически объясняется тем, что часть примеси, осажденной на поверхности, испаряется (отражается от поверхности) и переходит вновь в газовую фазу.

Коэффициент сегрегации выражается отношением концентрации примеси в твердой фазе к концентрации примеси в газовой фазе:

$$K = N_т / N_г.$$

Явлением сегрегации объясняется также более высокая концентрация примеси в рабочей смеси, чем требуемая концентрация в эпитаксиальном слое, так как $K<1$.

Влияние скорости осаждения и температуры пластин на удельное сопротивление слоя заметно проявляется в кинетической области, так как в этой области коэффициент сегрегации сильно зависит от условий осаждения. С повышением температуры пластин отражение возрастает, коэффициент сегрегации падает и ρ возрастает. При повышении скорости осаждения отражение уменьшается, K возрастает, а ρ падает.

По мере движения потока над пластинами происходит постепенное обогащение смеси примесью (так как $K<1$) и, следовательно, постепенное уменьшение удельного сопротивления пленок от входа в реактор к его выходу.

Для ослабления указанного эффекта целесообразно пластины располагать с наклоном около 10° к направлению потока, сохранив тем самым его ламинарность. Чтобы обеспечить достаточную загрузку реактора, удобнее располагать реактор вертикально, а подложки устанавливать на гранях пирамиды-держателя.

Автодиффузия. Высокие температуры процесса эпитаксии обусловливают побочный процесс — встречную диффузию примесей из растущей пленки в подложку и наоборот. Результатом этого является «размытие» *p-n*-перехода: вместо резкого ступенчатого образуется более или менее плавный переход. Положение усугубляется из-за последующей многократной обработки при высоких температурах (разделительная, базовая и эмиттерная диффузии, процессы окисления).

При значительной разности концентраций примеси в подложке и пленке (в эпитаксиально-планарной структуре эти концентрации отличаются на порядок) имеет место также заметное смещение *p-n*-перехода. В пленках малой толщины перераспределение примеси может существенно изменить свойства переходов коллектор — подложка и коллектор — база.

Если рассматривать подложку как полубесконечную среду, из которой происходит диффузия в ограниченный объем (пленку), то концентрация примеси в этом случае определится выражением

$$N=\frac{N_{оп}}{2}\ \mathrm{erfc}\frac{x}{2\sqrt{\sum_{1}^{n}D_it_i}}, \qquad (1.7)$$

где $N_{оп}$ — концентрация примеси в подложке, см$^{-3}$;

$$\sum_{1}^{n}D_it_i=D_1t_1+D_2t_2+\ldots+D_nt_n$$

(n — число операций, связанных с нагревом).

Встречная диффузия из пленки в подложку является случаем диффузии из ограниченного источника в полубесконечную среду. При этом

$$N=\frac{N_{оэ}}{2}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b-x}{2\sqrt{\sum D_it_i}}\right)+\mathrm{erf}\left(\frac{b+x}{2\sqrt{\sum D_it_i}}\right)\right], \qquad (1.8)$$

где $N_{оэ}$ — концентрация примеси в эпитаксиальной пленке, см$^{-3}$; b — толщина пленки, см; erf — символ функции ошибок.

Выражение (1.7) получено в предположении, что $N_{оэ}=0$, а выражение (1.8) — в предположении, что $N_{оп}=0$.

Для ослабления автодиффузии необходимо стремиться к сокращению числа операций диффузии (путем разработки рациональных структур), к замене термической диффузии ионным легированием и другими низкотемпературными способами легирования, к замене термического окисления кремния низкотемпературным осаждением пассивных пленок и т. п.

При выполнении эпитаксиальных процессов следует ориентироваться на низкотемпературные реакции (замена $SiCl_4$ на $SiBr_4$ или SiH_4), а также на легирующие элементы с малым коэффициентом диффузии (например, мышьяк).

§ 1.4. Пассивация

Назначение пассивных пленок и требования к ним. В полупроводниковых микросхемах пассивные пленки выполняют разнообразные и сложные функции.

При обработке пассивная пленка предохраняет монокристаллический кремний от воздействия технологических сред (газообразных и жидких), сохраняя тем самым его электрофизические свойства.

Наиболее жесткие требования предъявляются к пассивной пленке при локальной диффузии примесей, когда пленка выполняет роль защитной маски. В условиях длительного высокотемпературного нагрева толщина пленки должна быть достаточно большой, чтобы предотвратить проникновение легирующей примеси к поверхности кремния. Для пленки SiO_2, например, при диффузии бора достаточна толщина 0,4 мкм, при диффузии фосфора — 1 мкм. При повышенном содержании в пленке пор диффузия атомов примеси облегчается, поэтому толщина пленки должна быть увеличена.

Пассивная пленка в качестве изоляции межсоединений от кремния должна удовлетворять требованиям высокой электрической прочности, высокого удельного сопротивления и малой диэлектрической проницаемости.

При использовании пленки в МДП-приборах к ней предъявляют следующие требования:

1) идеальная граница раздела пленка — кремний, т. е. малая плотность поверхностных состояний;

2) хорошие диэлектрические свойства, т. е. малая плотность пор, высокое напряжение пробоя, большая диэлектрическая проницаемость и высокое удельное сопротивление;

3) устойчивость по отношению к внешним воздействиям — отсутствие движения ионов при повышенных температурах и в сильных электрических полях.

Требование высокой диэлектрической проницаемости пленки в МДП-приборах является более сильным, чем требование малой диэлектрической проницаемости пленки как изолятора между кремнием и межсоединениями. Удельная емкость, например, пленки SiO_2 при толщине 1 мкм равна примерно 30 пФ/мм^2 и не зависит от приложенного напряжения. Поскольку площадь отдельных проводников очень мала (порядка 0,001—0,01 мм^2), то монтажная емкость для проводников межсоединений остается пренебрежимо малой даже при повышении диэлектрической проницаемости.

Однако высокая диэлектрическая проницаемость пленки под затвором МДП-прибора дает возможность достигать заданной емкости затвора при большей толщине пленки, что уменьшает ее пористость.

Важнейшим требованием к пассивной пленке является требование технологичности, под которой понимают

совместимость процессов получения пленки с изготовлением интегральной схемы.

Достаточно полно перечисленным требованиям удовлетворяет пленка SiO_2, получаемая путем термического окисления поверхности кремния.

Термическое окисление кремния. При воздействии сухого кислорода на кремний при повышенной температуре в первые моменты времени адсорбция молекул кислорода кремнием сопровождается химическим взаимодействием и образованием окиси кремния SiO_2 (хемосорбция). По мере роста слоя SiO_2 хемосорбция уступает место диффузии молекул кислорода к поверхности кремния. В дальнейшем окисление происходит в три стадии: адсорбция кислорода, диффузия кислорода через окисный слой, реакция на границе раздела SiO_2—Si. При этом скорость роста пленки должна убывать с ростом толщины пленки, что объясняется увеличением времени диффузии кислорода через окисный слой.

Экспериментальное изучение процесса окисления показывает, что толщина окисла связана со временем окисления параболическим законом, т. е.

$$x^2 = Kt, \qquad (1.9)$$

где x — толщина окисла, мкм; t — время окисления, мин; K — постоянная окисления, зависящая от температуры окисления и давления кислорода, мкм²/мин.

Этот закон несправедлив для малых толщин пленок (до 0,01—0,02 мкм), когда проявляется хемосорбция.

Скорость роста пленки убывает обратно пропорционально толщине:

$$dx/dt = K/2x. \qquad (1.10)$$

При давлении кислорода $p = 1$ кГ/см² зависимость толщины пленки от температуры и времени определяется выражением

$$x^2 = 21{,}2t \cdot e^{-\frac{1{,}33}{kT}}, \qquad (1.11)$$

где T — абсолютная температура процесса, К; k — постоянная Больцмана, эВ/°С; 1,33 (эВ) — энергия активации процесса.

На рис. 1.25, *а* представлена зависимость толщины окисла кремния от температуры и времени окисления в сухом кислороде при давлении кислорода 1 кГ/см².

К преимуществу процесса относится высокое качество пленки, о чем свидетельствует ее высокая плотность (2,27 г/см³).

Недостаток процесса — его большая длительность, что объясняется малым коэффициентом диффузии кислорода в SiO_2. При температуре 1000° С коэффициент диффузии $D=10^{-14}$ см²/с. Согласно рис. 1.25, *а*, например, для получения пленки SiO_2 толщиной 1 мкм при $t=1300$° С требуется 15 ч.

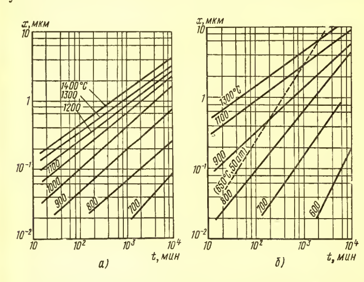


Рис. 1.25. Зависимости толщины окисла кремния от температуры и времени окисления:

а — в атмосфере сухого кислорода; *б* — в атмосфере водяного пара при нормальном давлении

Наложение постоянного электрического поля влияет на скорость роста пленки. Поэтому можно предполагать, что в процессе диффузии через окисел участвуют не нейтральные атомы, а ионы кислорода.

Процесс окисления кремния существенно ускоряется, если он протекает в атмосфере водяного пара. Как и при окислении в сухом кислороде, несколько монослоев окисла образуются за счет хемосорбции, после чего молекулы воды диффундируют через окисел к границе раздела SiO_2—Si, где происходит реакция

$$H_2O + Si \rightarrow SiO_2 + H_2$$

Водород, выделяющийся на границе раздела, достаточно быстро диффундирует к поверхности окисла ($D \approx \approx 10^{-6}$ см²/с). Зависимость толщины окисла от времени окисления также определяется параболическим законом и при давлении водяного пара 1 кГ/см² имеет вид

$$x^2 = 7{,}26t \cdot e^{-\frac{0{,}8}{kT}}, \qquad (1.12)$$

где 0,8 (эВ) — энергия активации процесса.

На рис. 1.25, *б* приведена зависимость толщины окисла в атмосфере водяного пара ($P=1$ кГ/см²) от времени и температуры процесса. Как следует из этой зависимости, толщина окисла 1 мкм при $t=1300°$ С достигается в течение 1 ч; при снижении температуры до 1000° С время увеличивается до 5 ч.

Более высокая скорость роста пленки по сравнению с ростом пленки в атмосфере сухого кислорода объясняется меньшей энергией активации процесса окисления и большим коэффициентом диффузии молекул воды в окисле (при 1000° С $D \approx 10^{-11}$ см²/с).

Так как скорость роста пленки окисла прямо пропорциональна давлению водяного пара, можно получить высокие скорости процесса за счет высокого давления пара. При давлении пара 50 кГ/см² и $t=650°$ С пленку толщиной 1 мкм получают за 400 мин (рис. 1.25, *б*); при нормальном давлении пара за это же время и при той же температуре образуется пленка толщиной лишь 0,02 мкм.

Преимуществом процессов окисления при высоком давлении пара является возможность одновременного снижения температуры и времени обработки, что очень важно для повышения воспроизводимости параметров диффузионных областей.

Недостатком данного процесса считают необходимость использования герметичной и прочной металлической камеры вместо «открытой» системы. При высоких давлениях водяного пара и повышенной температуре происходит реакция воды со стенками камеры, что обусловливает применение дорогостоящих покрытий (например, золотом).

Общим недостатком процессов окисления в атмосфере водяного пара является невысокое качество получаемых пленок и связанное с этим ухудшение защитных свойств. Пониженная плотность пленки (около 2 г/см³)

указывает на пористость из-за наличия водорода и гидроксильных групп OH.

Компромиссное решение можно получить при использовании комбинированного процесса — окисления во влажном кислороде. Меняя соотношение компонентов в смеси, можно получить энергию активации окисления в пределах от 1,33 эВ (для сухого кислорода) до 0,8 эВ (для водяного пара) и соответственно изменение скорости роста в широких пределах. При приемлемых скоростях роста плотность пленки достигается порядка 2,18—2,2 г/см³. При этом пленка толщиной 1 мкм является достаточной для проведения многократной диффузии. Зависимость толщины окисла кремния от времени во влажном кислороде приведена на рис. 1.26.

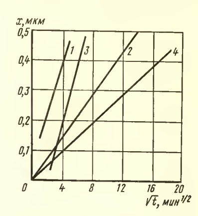


Рис. 1.26. Зависимость толщины окисла кремния от времени окисления во влажном кислороде (*1* и *2*) и увлажненном аргоне (*3* и *4*) при $t = 1200°$ С; температура воды в увлажнителе 85° С (*1* и *3*) и 28° С (*2* и *4*)

Схема установки для термического окисления кремния представлена на рис. 1.27. Кремниевые пластины устанавливают в кварцевой кассете, которую в свою очередь помещают в кварцевую трубу, снабженную нагревателем. Кислород подается в зону окисления либо непосредственно с помощью крана *1*, либо с помощью кранов *2* и *3* через увлажнитель — емкость со сверхчистой (деионизованной) водой, снабженную нагревателем и термометром. В зависимости от расхода кислорода и температуры воды в увлажнителе можно получить различное соотношение компонентов в смеси. При окис-

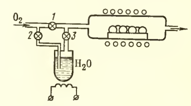


Рис. 1.27. Схема установки для термического окисления кремния

лении во влажном кислороде температура в увлажнителе устанавливается обычно в пределах 80—110° С, расход кислорода порядка 0,5 л/мин.

Для окисления кремния в парах воды через увлажнитель может быть пропущен транспортирующий инертный газ (азот, аргон и т. п.).

Практика показала, что чередование этапов окисления в сухом кислороде и во влажном позволяет получить качественные пленки при удовлетворительной производительности процесса. Это объясняется тем, что пористая пленка, полученная во влажном кислороде и обработанная затем в сухом кислороде, уплотняется («подсушивается») за счет удаления гидроксильных групп и десорбции водорода.

Схема процесса в этом случае примерно выглядит так:

1) нагрев рабочей зоны до 1150° С и выдержка 30 мин;

2) установка кассеты с пластинами в рабочую зону;

3) подача сухого кислорода в течение 15 мин;

4) подача влажного кислорода в течение 1 ч 45 мин (температура в увлажнителе 80° С, расход кислорода 0,5 л/мин);

5) подача сухого кислорода в течение 1 ч.

В отлаженном процессе термического окисления толщина выращенной пленки контролируется временем окисления.

При отладке процесса толщину пленки можно измерить интерференционным методом с помощью микроскопа, для чего предварительно создают «ступеньку» путем полного стравливания окисла с участка поверхности пластины (точность измерения до 10 Å). При достаточном навыке толщину пленки можно определять методом цветовых оттенков, в котором используется свойство окиси кремния менять свой цвет в зависимости от толщины (относительная ошибка не более 5%). Может быть использован также метод сферического шлифа (см. § 1.2).

Явления, сопутствующие процессу термического окисления. В полупроводниковых ИС чистый (беспримесный) кремний практически не применяют. Окислению подвергается кремний, содержащий легирующие примеси. Это может существенно влиять на процесс окисления и на параметры диффузионных областей, находящихся под окисной пленкой.

Содержащаяся в кремнии примесь может влиять на скорость окислительной реакции на границе раздела SiO_2 — Si, а также на коэффициент диффузии окислителя (кислорода, воды) в окисной пленке — повышение концентрации примеси в кремнии повышает скорость окисления кремния, а повышение концентрации примеси в окисной пленке ускоряет диффузию окислителя.

Окисление кремния сопровождается явлением сегрегации примеси, т. е. перераспределением примеси между кремнием и окисной пленкой. Если под коэффициентом сегрегации понимать отношение растворимости примеси в Si к растворимости примеси в SiO_2, то для фосфора этот коэффициент равен примерно 10, а для бора — 0,3. Это означает, что фосфор оттесняется растущим окислом в кремний (эффект, который особенно ощутим для слаболегированных областей, например коллекторных), а бор, наоборот, переходит в растущую пленку, обедняя поверхностный слой кремния.

Другим явлением, характерным для термического окисления кремния, является присутствие в пленке окисла связанного положительного заряда. Предполагается, что причина этого заключается в наличии свободных связей у атомов кремния вблизи границы раздела SiO_2 — Si из-за недостатка кислорода, в результате чего возникают положительные ионы кремния. При окислении, например, во влажном кислороде плотность заряда составляет около $1{,}5 \cdot 10^{11}$ $см^{-2}$, в сухом кислороде — на несколько порядков выше (отсутствие групп Si — H или Si — OH). Положительный пространственный заряд в пленке окисла способен изменить концентрацию подвижных носителей в поверхностном слое кремния: отталкивать дырки в глубь области и притягивать электроны к поверхности раздела. Уменьшения плотности заряда можно достичь путем облучения поверхности раздела SiO_2 — Si электронами низких энергий (например, 10 кэВ, доза облучения $\sim 5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$).

Обогащение поверхности кремния фосфором при окислении вследствие сегрегации и повышение концентрации электронов в поверхностном слое под влиянием пространственного заряда повышают электронную электропроводность поверхности диффузионных областей. В транзисторе типа *n-p-n* эти явления опасны для коллекторной и базовой областей.

Обогащение коллекторной области носителями *n*-типа может сильно уменьшить коллекторное пробивное напряжение. В базовой области по тем же причинам может возникнуть проводящий канал между эмиттером и коллектором (токи утечки или даже короткое замыкание).

К недостаткам термически выращенного окисла SiO_2 следует отнести также невысокую стойкость против проникновения водяных паров и ионов щелочных металлов (последние образуют положительный заряд на границе $Si — SiO_2$), а также сравнительно малые коэффициенты теплопроводности. Наличие в пленке легирующих примесей снижает качество фотолитографии, а высокие температуры окисления изменяют параметры легированных областей.

Таким образом, с термическим окислением связаны трудноконтролируемые и неуправляемые явления, которые могут привести к внезапным или постепенным отказам. Поэтому естественна тенденция использовать иные материалы и процессы для пассивации кремния, которые позволяли бы сохранить неизмененными параметры диффузионных областей.

Тенденции развития методов пассивации. Дальнейшее совершенствование методов пассивации определяется тремя задачами:

1) освоением новых материалов, обладающих лучшими защитными и диэлектрическими свойствами, чем термически выращенный окисел;

2) заменой процесса выращивания пленки за счет материала пластины процессами осаждения;

3) уменьшением температурного воздействия на пластину в процессе пассивации.

В качестве пассивирующей пленки перспективным считают нитрид кремния Si_3N_4, пленки которого имеют хорошие защитные свойства уже при толщине 0,2 мкм. Кроме того, нитридные пленки имеют бо́льшие диэлектрическую проницаемость (в 2—2,5 раза) и коэффициент теплопроводности (примерно на порядок).

В качестве диэлектрических пленок для МДП-структур исследуют окислы металлов Al_2O_3, TiO_2, Ta_2O_5 и другие, обладающие высокой стабильностью свойств и позволяющие создавать МДП-приборы с малым пороговым напряжением, что повышает быстродействие и уменьшает потребляемую мощность.

Таблица 1.8

Электрофизические свойства диэлектрических материалов для полупроводниковых ИС

Свойства	Si_3N_4	TiO_2	Ta_2O_5	Nb_2O_5	Al_2O_3
Структура пленки	Аморфная	Поликристаллическая	Аморфная	Аморфная	Аморфная
Ширина запрещенной зоны, эВ	4,7	>5	4,2	3,5	>5
Диэлектрическая проницаемость	5,5—9,4	20—50	22—50	33—46	7—10
Тангенс угла потерь (на частоте 1 кГц)	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$—10^{-3}
Электрическая прочность, В/см	$\sim 10^6$	$5 \cdot 10^5$	$>10^5$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
Плотность поверхностных состояний, $см^{-2}$	$\sim 10^{11}$	$8,5 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$

В табл. 1.8 приведены основные электрофизические свойства диэлектрических пленок перечисленных материалов.

Основные требования, которым должен удовлетворять процесс осаждения диэлектрической пленки:

1) простота процесса (в частности, возможность использования «открытой» системы);

2) невысокая температура подложек в процессе осаждения;

3) достаточно высокая скорость осаждения (малая продолжительность обработки);

4) отсутствие в рабочей зоне веществ, реагирующих с кремнием подложки;

5) гетерогенный характер реакций, обусловливающий слабую зависимость результатов осаждения от количества подложек и их расположения в рабочей зоне, т. е. от геометрии системы.

Метод осаждения используется в частности для осуществления межслойной изоляции в больших интегральных схемах (БИС). Для осаждения окиси кремния может быть использована реакция окисления силана:

$$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 \downarrow + H_2O$$

Процесс осуществляется при температуре 300° С. Скорость осаждения v зависит от расхода q силана и кислорода (рис. 1.28) и достигает 0,1 мкм/мин.

К недостаткам процесса следует отнести токсичность и взрывоопасность силана.

Осаждение пленки SiO_2 может быть осуществлено путем пиролитического разложения тетраэтоксисилана $Si(OC_2H_5)_4$. При температуре

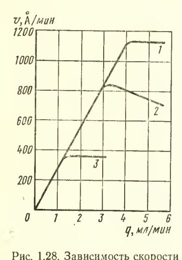


Рис. 1.28. Зависимость скорости осаждения v окиси кремния от расхода q силана при расходах кислорода:
1 — 88 мл/мин, 2 — 58 мл/мин, 3 — 36 мл/мин

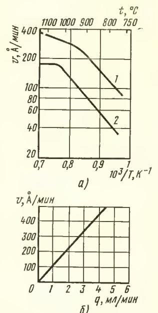


Рис. 1.29. Зависимость скорости осаждения нитрида кремния:
а — от температуры подложки при расходах силана 2 мл/мин, аммиака 20 л/мин (1) и 40 л/мин (2); б — от расхода силана при расходе аммиака 20 л/мин

разложения 750° С скорость осаждения составляет 0,03 мкм/мин.

Из возможных процессов осаждения нитрида кремния наиболее подробно изучен процесс взаимодействия силана и аммиака:

$$SiH_4 + NH_3 \rightarrow Si_3N_4 \downarrow + H_2$$

Как и в случае окисления силана, для обеспечения стехиометрии состава пленки и безопасности процесса

концентрация силана в аммиаке должна быть малой. Зависимости, связывающие скорость осаждения с температурой процесса и расходом силана и аммиака, представлены на рис. 1.29.

Для осаждения нитрида кремния может также быть использована реакция взаимодействия тетрахлорида кремния с аммиаком:

$$SiCl_4 + NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + HCl$$

При температуре подложки 1000° С скорость осаждения превышает 0,1 мкм/мин.

Перспективными процессами для получения окислов Al_2O_3 и TiO_2 являются реакции пиролитического разложения металлоорганических соединений — $(C_3H_7O)_3Al$ (триизопропоксиалюминий) и $(C_4H_9O)_4Ti$ (тетрабутокси-титан). Пары этих соединений вводятся в камеру разложения с помощью транспортирующего газа.

Изучается возможность использования в качестве пассивирующих покрытий окислов редкоземельных металлов (иттрия, скандия, диспрозия и др.) и их композиций. Указанные окислы служат лучшей защитой от проникновения ионов щелочных металлов, чем двуокись кремния и нитрид кремния. Пленки толщиной 0,2 мкм могут применяться в качестве масок в процессах диффузии, а также изоляторов для затворов в МДП-приборах. Исходными продуктами для осаждения пленок являются хлориды редкоземельных металлов.

Кроме указанных процессов возможно использование вакуумного напыления, ионно-плазменного (высокочастотного) распыления и реактивного распыления. Однако эти процессы не удовлетворяют первому и пятому из требований, сформулированных ранее, и потому могут быть рекомендованы только для лабораторных исследований единичных образцов.

§ 1.5. Металлизация

Процесс формирования межсоединений в ИС складывается из двух этапов — *металлизации* и *фотолитографии* по металлической пленке.

Металлизация — это нанесение на кремниевую пластину сплошной металлической пленки для получения качественных омических контактов с элементами ИС и покрытия высокой проводимости, надежно сцепляющегося с окисной пленкой SiO_2. Предварительно в окисной

пленке методом фотолитографии создают окна под будущие электрические контакты металла с кремнием.

Фотолитография по металлической пленке обеспечивает требуемую конфигурацию проводников межсоединений, а также формирует по периферии кристалла контактные площадки, необходимые для присоединения внешних выводов (рис. 1.30).

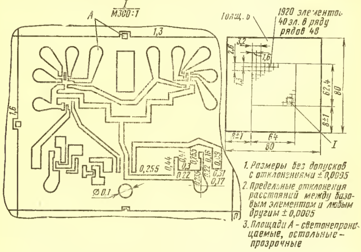


Рис. 1.30. Фотошаблон для получения межсоединений

Основные требования к металлизации ИС. Исходя из общих задач металлизации, можно сформулировать следующие требования к металлу межсоединений:

1) высокая проводимость;

2) возможность травления без воздействия на кремний и окись кремния;

3) невысокая температура испарения, облегчающая получение чистых пленок;

4) легкая окисляемость, обеспечивающая высокую адгезию с пленкой SiO_2 и восстановление следов SiO_2 на участках контакта с кремнием;

5) достаточная растворимость в кремнии, позволяющая производить вжигание контактов в твердой фазе (путем диффузии);

6) отсутствие химических соединений с кремнием, снижающих механическую прочность контакта и проводимость;

7) высокая пластичность, противодействующая циклическому изменению температуры.

Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяет высокочистый алюминий марки АВ-000.

Технология процесса металлизации алюминием. Наиболее целесообразным процессом металлизации алюминием является процесс вакуумного термического испарения алюминия из испарителей резистивного типа. Процесс испарения алюминия, имеющего условную температуру испарения 996° С, осуществляют обычно на многопозиционных вакуумных установках УВН при непрерывном вращении многопозиционной карусели с подложками, при остаточном давлении порядка 10^{-6} мм рт. ст. и температуре подложек 200° С.

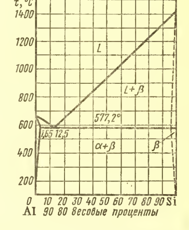


Рис. 1.31. Диаграмма состояния системы Al—Si

Вжигание контактов производят после фотолитографии при температуре, ниже эвтектической (рис. 1.31) без образования жидкой фазы. Рекомендуемый режим — нагрев при температуре 550° С в течение 5 мин. В результате нагрева через границу раздела Al—Si происходит встречная диффузия алюминия и кремния. Наличие алюминия в поверхностном слое кремния не должно приводить к образованию выпрямляющих контактов (см. § 1.2). Одновременно происходит реакция алюминия с двуокисью кремния, что повышает адгезию металлического слоя.

Растворение кремния в алюминии и окисление алюминия несколько повышает электросопротивление алюминиевой пленки. Так, пленка алюминия толщиной 1 мкм, полученная термическим напылением в вакууме, имеет удельное сопротивление $3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, а исходный массивный алюминий — $2{,}7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

Отказы, связанные с металлизацией алюминием. Алюминий, являясь практически единственным металлом, ис-

пользуемым для межсоединений, обладает рядом недостатков. К ним относятся:

1) низкая твердость и поэтому возможность механического повреждения;

2) большой *TKl* по сравнению с кремнием и окисью кремния;

3) легкая окисляемость и образование прочной (хотя и тонкой) пленки Al_2O_3, ухудшающей контакт между различными уровнями металлизации в БИС;

4) интенсивная реакция с окисью кремния, особенно опасная для затворов МДП-приборов, а также для межслойной изоляции в БИС;

5) сложность пайки или сварки выводов.

Отказы, связанные с металлизацией, являются основными отказами ИС при повышенных нагрузках (около 25% всех отказов). Причинами этих отказов являются: разрыв проводников на ступеньках окисла, коррозия металла, взаимодействие окисла с металлом при локальных увеличениях температуры, замыкание алюминия на кремний через поры окисла при низкотемпературной рекристаллизации, разрыв проводников и нарушение контакта с кремнием вследствие электродиффузии.

Под электродиффузией понимают перенос вещества при высоких плотностях тока.

Разрыв проводника в результате электродиффузии объясняется следующим. В сплошном металлическом проводнике на термически возбужденный ион металла в узле решетки действует сила, направленная навстречу электронному потоку (действие приложенного к проводнику электрического поля), и сила, действующая по направлению электронного потока («электронный ветер»), которая появляется за счет обмена импульсами при столкновении электронов проводимости и возбужденных ионов металла. Вследствие экранирующего влияния электронов сила, с которой электрическое поле действует на ион, невелика; поэтому преобладающей является сила «электронного ветра». В результате возбужденные ионы имеют бо́льшую вероятность перейти в вакансию по движению электронов, чем против движения, т. е. ионы металла перемещаются к положительному концу проводника, а вакансии — к отрицательному. При этом вакансии скапливаются в виде пустот, а ионы образуют усы, бугры и т. п.

Нарушение контакта алюминия с кремнием вследствие электродиффузии связано с образованием «ямок травления». В результате обмена импульсами между термически возбужденными ионами кремния и электронами становится возможным дальнейшее растворение кремния в алюминии (сверх насыщения). Перемещение ионов кремния наблюдается в направлении от «+» к «—», т. е. против электронного потока. Поэтому нарушение контакта вследствие «ямок травления» наблюдается только у положительных контактов.

Процесс электродиффузии ускоряется при повышении температуры и плотности тока.

По данным американских исследователей средняя наработка на отказ

$$t_{ср}=\frac{A}{J^2}\,e^{\frac{E_а}{kT}}, \qquad (1.13)$$

где A — постоянная, зависящая от геометрии и структуры пленки; J — плотность тока; $E_а$ — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Отказы из-за электродиффузии становятся существенными при плотностях тока свыше $5\cdot10^4$ А/см² и температурах выше 150° С.

Для получения хорошего контакта между первым и вторым уровнями металлизации в БИС (из-за наличия пленки Al_2O_3) используют различные технологические приемы. Например, осуществляют термическую обработку пластины при $t=500°$ С после нанесения второго слоя. В результате рекристаллизации (рост крупного зерна) обоих слоев происходит механическое разрушение тонкого слоя окиси алюминия. Другой путь — нанесение второго слоя алюминия катодным распылением с предварительной ионной бомбардировкой поверхности в разряде инертного газа.

Другие системы металлизации. Исследования и разработки новых систем металлизации обусловлены перечисленными недостатками алюминия и прежде всего взаимодействием его с окисью кремния, легкостью окисления и заметной электродиффузией, связанной с относительно малой энергией активации (1,1—1,5 эВ).

Компромиссное решение дают двухслойные системы металлизации, состоящие из нижнего адгезионного слоя

(W, Mo, Cr, Ti и др.) и верхнего проводящего слоя (Au, Ag, Cu и др.). Для нанесения тугоплавких материалов может быть использовано испарение в вакууме с электронно-лучевым нагревом либо катодное распыление.

Для кремния n-типа с удельными сопротивлениями до 0,1 Ом·см и для кремния p-типа с сопротивлениями до 0,5 Ом·см указанные материалы имеют малое контактное сопротивление. С повышением ρ удельное контактное сопротивление и нелинейность этого сопротивления растут.

Экспериментально установлено, что предварительное нанесение подслоя силицида платины PtSi уменьшает контактное сопротивление, уменьшает нелинейность и увеличивает температурную стабильность. Важно отметить, что величина контактного сопротивления почти не зависит от напыляемого вслед затем металла, поэтому можно предполагать наличие потенциального барьера на границе PtSi — Si.

Нанесение платины осуществляется электронно-лучевым испарением в вакууме или катодным распылением на поверхность пластины, прошедшей фотолитографическую обработку по слою SiO_2. После обработки при 600—700° С в окнах образуется силицид платины. Далее платину удаляют с участков, покрытых SiO_2, путем избирательного травления. Очень важно тщательное удаление SiO_2 в контактных окнах, так как платина не восстанавливает окисел кремния (в отличие от алюминия).

Для уменьшения и стабилизации контактного сопротивления может быть применен дополнительный отжиг при $t=450°$ С в течение 15 мин.

Аналогичными свойствами обладают силициды кобальта, палладия, железа, титана.

Некоторые многослойные системы металлизации уже нашли практическое применение. Так, в ИС на биполярных транзисторах используется система молибден — золото, в ИС с балочными выводами — система титан — золото, а в МДП-структурах — система хром — золото. Использование золота в качестве проводящего слоя уменьшает вероятность отказов, связанных с электродиффузией, что объясняется повышенной энергией активации (примерно 1,8 эВ).

Уменьшить электродиффузию можно также путем выбора многокомпонентных сплавов с большой энергией активации электродиффузии. Исследованы, например,

возможности применения сплавов Al-Cu-Mg и Al-Cu-Ni-Mg и при этом достигнуто существенное увеличение средней наработки на отказ. По сравнению с чистым алюминием сплавы имеют повышенное удельное сопротивление.

§ 1.6. Фотолитография

Назначение фотолитографии и схема процесса. Сущность фотолитографии заключается в том, что на поверхности подложки создается защитная фотомаска высокой точности, затем незащищенные участки поверхности подвергают травлению. Фотолитография является важным этапом производства не только полупроводниковых, но и тонкопленочных микросхем. Однако в производстве полупроводниковых микросхем по сравнению с производством тонкопленочных микросхем требования к точности и разрешающей способности процесса более жесткие, а влияние процесса на экономичность производства и надежность микросхем более сильное.

В полупроводниковых микросхемах фотолитографию используют в следующих случаях:

1) для глубокого избирательного травления кремния при создании диэлектрической изоляции между элементами («кармашковая» структура), при создании воздушной изоляции элементов в схемах с балочными выводами и гетероэпитаксиальных схемах;

2) для избирательного травления двуокиси кремния (или другой пассивной пленки) при локальной диффузии легирующих примесей в кремний, а также при создании омических контактов к элементам;

3) для избирательного травления металлической пленки при создании межсоединений;

4) для избирательного травления резистивных и диэлектрических пленок при формировании элементов в совмещенных микросхемах.

На рис. 1.32 приведена общая схема процесса фотолитографии. По структуре этот процесс совпадает с известным фотохимическим методом образования проводников печатных плат. Однако каждый этап фотолитографии имеет свою специфику, обусловленную требованиями высокой разрешающей способности, повышенной стойкости фотомаски к действию кислот и щелочей и тщательной очистки (отмывки) заготовок от следов

органических и неорганических веществ, используемых в ходе процесса.

Фоторезисты. Толщина защитной фотомаски должна быть достаточно малой, чтобы иметь возможность формировать элементы малых размеров. Установлено, что толщина маски должна быть в несколько раз меньше минимального размера элементов рисунка. В то же время фотомаска должна противостоять действию сильных травителей. При использовании фотоэмульсий на основе поливинилового спирта и бихромата аммония (известных в производстве печатных плат) для травления двуокиси

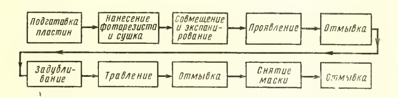


Рис. 1.32. Схема процесса фотолитографии

кремния потребовалась бы маска толщиной не менее 10 мкм. В таких условиях получение элементов рисунка с размерами в единицы микрометров невозможно. Требованию высокой кислотоустойчивости (стойкости против кислотных и щелочных травителей) при малой толщине слоя удовлетворяют специально синтезированные светочувствительные полимеры, получившие название фоторезистов.

Помимо кислотоустойчивости (которая оценивается временем проникновения травителя через фотослой) фоторезист должен обладать достаточно высокой чувствительностью в определенном диапазоне волн. Сравнительной оценкой чувствительности фоторезиста может служить время экспонирования фотослоя определенной толщины. Разрешающая способность фоторезистов должна быть не ниже 1000 лин/мм. В этом случае разрешающая способность процесса фотолитографии в целом может быть достигнута порядка 200 лин/мм, что позволяет формировать элементы с размерами до 2,5 мкм.

По характеру реакции на воздействие света фоторезисты делятся на негативные и позитивные. Негативные фоторезисты под воздействием ультрафиолетового света

переходят в нерастворимое состояние и создают после проявления защитные участки, соответствующие прозрачным участкам фотошаблона (негативное изображение рисунка фотошаблона). В позитивных фоторезистах освещенные участки изменяют свои свойства так, что могут быть удалены с помощью соответствующих растворов. Незасвеченные участки при этом сохраняются, повторяя рисунок фотошаблона (позитивное изображение).

К преимуществам позитивных фоторезистов по сравнению с негативными относятся:

1) высокая разрешающая способность, обусловленная слабым влиянием побочных явлений в фотослое при экспонировании (дифракции и отражения света от подложки);

2) высокая контрастность (резкая зависимость глубины проработки слоя от времени выдержки);

3) спад чувствительности на более длинных волнах, что позволяет использовать стеклянные фотошаблоны вместо кварцевых.

Однако преимущества позитивных фоторезистов не исключают возможность использования на отдельных этапах производства негативных фоторезистов. Например, для некоторых травителей негативный фоторезист предпочтительнее позитивного с точки зрения кислотоустойчивости. Кроме того, у негативных фоторезистов проще проявление: в качестве проявителя можно использовать органический растворитель, не взаимодействующий с поверхностью пластины.

Типичным среди негативных фоторезистов является поливинилциннамат, имеющий разрешающую способность свыше 500 лин/мм и длинноволновую границу спектральной чувствительности 0,41 мкм. Позитивные фоторезисты создаются на основе нафтохинондиазида с новолаком, имеют разрешающую способность порядка 1000 лин/мм и границу спектральной чувствительности 0,48 мкм. Из отечественных фоторезистов наибольшее распространение в промышленности нашел позитивный фоторезист ФП-383.

В табл. 1.9 приведены фототехнические характеристики некоторых отечественных фоторезистов.

Подготовка поверхности пластины к нанесению фотослоя. Перед нанесением слоя фоторезиста поверхность обезжиривают и отмывают в деионизованной (обессолен-

Таблица 1.9

Фототехнические характеристики фоторезистов

Характеристики	ФП-383	ФП-307	ФП-333В	ФП-330	ПВЦ
Тип фоторезиста	Позитивный	Позитивный	Позитивный	Позитивный	Негативный
Максимум спектральной чувствительности, мкм	0,407	0,407	0,475	0,407	0,28—0,32
Разрешение при толщине пленки в мкм, мкм	4/1	2,5/1	2,5/1	5/1	2/0,3
Весовая концентрация в растворителе, %	20	20	22	20	5—7
Плотность при 20° С, г/см³	1,102	1,103	0,997	—	—
Кинематическая вязкость, сст	5,9	6,9	3,5	—	—
Относительная летучесть (по ацетону)	3,8	3,8	12	—	—
Поверхностное натяжение при 20° С, эрг/см²	32,26	35,26	28,7	—	—

ной) воде, так как жировые пленки на поверхности пластины резко снижают адгезию фоторезиста к поверхности, что ведет к подтравливанию и ухудшению разрешающей способности процесса в целом. Жировые пленки снижают также скорость процесса травления и ухудшают его однородность.

Для обезжиривания пластины кипятят в органических растворителях (ацетон, толуол, диоксан, дихлорэтилен и др.) или обрабатывают в парах этих растворителей. Преимущество последнего процесса — непрерывное удаление загрязненного растворителя и обработка поверхности чистым растворителем. На рис. 1.33 представлена схема установки ОПР для обработки пластин в парах растворителя. Групповую обработку пластин (до 24 шт.) производят в герметичной камере. Пары растворителя, попадая в рабочую камеру и конденсируясь на кремниевых пластинах, активно очищают их поверхность. Отработанный пар и конденсат отсасываются в холодильную

камеру, откуда затем сливаются в специальную емкость. Цикл обработки не превышает 5 мин.

Отмывкой пластин удаляют остатки растворителя и следы неорганических загрязнений. В процессе фотолитографии отмывку повторяют многократно, она существенно влияет на качество микросхемы в целом. Подробнее отмывка пластин будет рассмотрена далее.

Нанесение и сушка фотослоя. В процессе нанесения фотослоя на поверхность пластины необходимо обеспечить равномерность его по толщине и однородность по структуре (отсутствие пор, вкраплений инородных частиц и т. п.). Неравномерная толщина является причиной неплотного прилегания фотошаблона к фотослою на этапе экспонирования и локального ухудшения контрастности из-за наличия воздушных зазоров. Наличие пор и инородных частиц приводит на этапе травления к непланируемым микрообластям, подвергающимся травлению. При диффузии примесей, например, они образуют паразитные диффузионные области, особенно опасные, если они приходятся на область *p-n*-перехода.

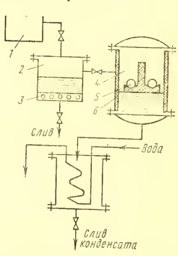


Рис. 1.33. Схема установки для обработки пластин в парах растворителя:

1 — емкость с растворителем; 2 — камера подогрева растворителя; 3 — нагреватель; 4 — рабочая камера; 5 — кремниевые пластины; 6 — теплоизолирующий слой

Наиболее распространенным методом нанесения фотослоя является центрифугирование. При этом пластину помещают в центре платформы центрифуги, прижимают с помощью вакуумного присоса и приводят вместе с платформой во вращение. При вращении в центр пластины наносят дозированное количество раствора фоторезиста. Центробежные силы выравнивают слой фоторезиста по поверхности.

Уменьшение толщины слоя с увеличением скорости

вращения платформы происходит до определенного предела, когда центробежные силы оказываются уравновешенными когезионными силами фоторезистивной пленки. Для данной концентрации основы в растворителе (диоксан, толуол и т. п.) существует критическая скорость, выше которой уменьшение толщины слоя не происходит. Например, при нанесении поливинилциннамата, имеющего концентрацию 15% по весу в органическом растворителе (толуол : хлорбензол = 3 : 1), критическая скорость равна 1000 об/мин. При этом толщина слоя составляет 0,5 мкм.

Толщину фотослоя целесообразно менять не за счет скорости вращения, а за счет консистенции раствора фоторезиста. Толщину фотослоя можно также увеличить путем двухкратного или трехкратного покрытия (чередующегося с сушкой). При этом толщина увеличивается не пропорционально числу покрытий, так как происходит частичное растворение ранее нанесенного слоя (в приведенном примере двухкратное покрытие позволяет получить слой толщиной 0,75 мкм). Для воспроизводимости результатов по толщине скорость вращения должна быть выше критической.

Характерными недостатками центрифугирования являются наличие краевого утолщения слоя (что обеспечивает равномерность по толщине лишь в пределах ±10%) и наличие прогрессирующих дефектов слоя в области вкрапленных инородных частиц из-за действия центробежных сил.

Одним из возможных процессов нанесения фотослоя является пульверизация (распыление) фоторезиста. Распыление фоторезиста осуществляют сухим подогретым инертным газом. К основным преимуществам процесса относятся:

1) широкий диапазон толщин (0,5—20 мкм);

2) высокая однородность по толщине (отсутствие краевого утолщения);

3) отсутствие проколов (пор) и разрывов пленки;

4) возможность нанесения слоя на рельефную поверхность;

5) возможность многоместной обработки и автоматизации процесса.

Для уменьшения плотности инородных частиц в фотослое пластины транспортируют на операцию в специальных контейнерах, а сам процесс нанесения осуществляют

в обеспыленных скафандрах (запыленность атмосферы в скафандрах — не более 4 пылинок размером 0,5 мкм в 1 л воздуха).

После нанесения фотослоя для полного удаления органического растворителя производят сушку. Температура и время сушки должны исключать возможность термического задубливания фоторезиста (80 — 120° С не более 20 мин).

При распространенной конвекционной сушке (с подачей горячего обеспыленного воздуха или азота) образуется поверхностная плотная корка, в результате чего процесс удлиняется, а в фотослое образуются микротрещины из-за выделяющихся паров растворителя и поры вследствие неполного удаления растворителя. Прогрессивным методом, обеспечивающим высокое качество сушки, является сушка с помощью инфракрасного излучения. Инфракрасное излучение с длиной волны свыше 0,9 мкм поглощается кремнием и пропускается фоторезистом. Это позволяет осуществлять сушку с поверхности пластины без образования корки и растрескивания.

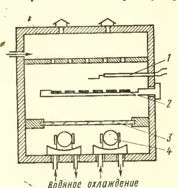


Рис. 1.34. Схема камеры сушки ИК-излучением:
1 — термопара; 2 — кремниевые пластины; 3 — кварцевый экран; 4 — лампы ИК-излучения

На рис. 1.34 приведена схема камеры сушки отечественной установки СИ-200. Камера монтируется на задней стенке установки нанесения фоторезиста, и пластины могут попадать на сушку без вынесения в атмосферу. В качестве излучателей применены лампы НИК-500 (максимум излучения на длине волны 1—1,2 мкм). Экраны из нержавеющей стали охлаждают проточной водой. Кремниевые пластины располагают фотослоем вверх на фторопластовом основании, пропускающем ИК-излучение в диапазоне 1—8 мкм. Термопара позволяет производить регулировку температуры. Для удаления паров растворителя применяют слабую продувку внутреннего объема камеры осушенным воздухом.

Технические характеристики камеры инфракрасной сушки СИ-200

Производительность	20 пластин/ч
Режим работы	полуавтоматический
Количество одновременно обрабатываемых пластин	6 шт.
Диапазон температур сушки	60—200° С
Точность поддержания заданной температуры	±1° С
Количество ламп НИК-500	2 шт.
Мощность, потребляемая одной лампой	500 Вт
Диапазон длин волн	1,5—15 мкм
Общая мощность	1,2 кВт
Расход сжатого воздуха	1 $м^3$/ч
Расход водопроводной воды	80 л/ч
Габаритные размеры	340×250×340 мм
Масса	25 кг

Формирование фотомаски. Скрытое изображение фотомаски в слое фоторезиста достигается экспонированием фоторезиста через групповой фотошаблон. Экспонирование фоторезиста можно осуществлять контактным или проекционным способом. Однако для проекционного способа требуется высококачественная оптика, в которой совмещаются два противоречивых требования: большое поле зрения и высокая разрешающая способность по всему полю. Поэтому преимущественное распространение нашел контактный способ.

В процессе производства полупроводниковых микросхем фотолитографию применяют многократно, для чего требуется комплект фотошаблонов. Например, в производстве эпитаксиально-планарных ИС со скрытым слоем используют комплект из шести шаблонов с точно согласованными рисунками (под диффузию скрытых слоев, разделительную диффузию, базовую диффузию, эмиттерную диффузию, омические контакты и межсоединения). Поэтому важнейшим требованием становится совмещение рисунков на отдельных этапах. Практически это требование сводится к точному расположению рисунка фотошаблона относительно рисунка предыдущей фотолитографии.

Визуальное совмещение возможно благодаря наличию на поверхности пластины «предыстории» обработки (рисунок предыдущей фотолитографии образуется в виде ступенек окисла и цветных оттенков окисла разной толщины), а также прозрачности тонкого фотослоя. Совре-

менное производство предъявляет очень жесткие требования к точности совмещения (±0,5 мкм и менее), поэтому базовый метод (установка пластины и фотошаблона на единые базовые элементы) из-за низкой точности (±10 мкм) не может быть применен. Кроме того, он существенно усложнил бы процесс изготовления пластин и фотошаблонов. В производстве ИС используют визуальный метод совмещения по специальным знакам, которые предусматривают в рисунке каждого фотошаблона (см. рис. 1.30).

Визуальный метод заключается в одновременном наблюдении в неактивном свете с помощью микроскопа рисунка на пластине и рисунка фотошаблона. Оператор должен точно наложить знаки совмещения пластины и фотошаблона, для чего используют механизмы перемещения в двух направлениях и поворота фотошаблона относительно пластины. Точность совмещения при визуальном методе зависит от плавности перемещений (зависящей также от увеличения микроскопа), точности фиксаций этих перемещений и типа знаков совмещения.

Наиболее высокую точность совмещения при прочих одинаковых условиях обеспечивают знаки совмещения с контролируемым зазором. При наложении отметок совмещения, одинаковых по конфигурации, но отличающихся по размерам на величину зазора δ, задача оператора заключается в том, чтобы сохранить некоторый зазор между отметками по всему контуру. При этом совмещение знаков должно быть осуществлено на двух противоположных краях пластины, что исключает разворот рисунков вокруг оси, перпендикулярной плоскости изображений. В этом случае несовмещение отметок не превышает $\pm\delta$, что и определяет точность совмещения рисунков при условии идеальной совмещаемости смежной пары групповых фотошаблонов. В действительности из-за различия в шаге расположения отдельных изображений по горизонтали и вертикали погрешность совмещения превышает величину $\pm\delta$. Под совмещаемостью фотошаблонов понимают максимально возможное взаимное смещение соответствующих изображений любой пары фотошаблонов комплекта при идеальном совмещении центральных изображений.

Величину δ устанавливают исходя из наиболее жесткого допуска на элементы рисунка. Таким элементом обычно является зазор между двумя диффузионными об-

ластями микросхемы. Действительный зазор δ между отметками совмещения зависит от масштаба и точности изготовления фотооригинала, т. е.

$$\delta = \delta_н \pm 2\delta_к / M, \qquad (1.14)$$

где $\delta_н$ — номинальное значение зазора отметок совмещения; $\delta_к$ — предельное отклонение размеров фотооригинала (погрешность координатографа); M — масштаб фотооригинала.

В формуле (1.14) не учтены погрешности, возникающие при изготовлении рабочего фотошаблона в процессе контактной печати и избирательного травления.

Однако δ не должен быть меньше разрешающей способности микроскопа σ, т. е. $\delta \geqslant \sigma$. Разрешающая способность микроскопа (расстояние между двумя разрешаемыми точками)

$$\sigma = \lambda / 2A, \qquad (1.15)$$

где λ — длина волны света, в котором производится наблюдение; $A = n \sin u$ — числовая апертура объектива (n — показатель преломления среды, u — апертурный угол).

Линейная разрешающая способность нормального глаза

$$a = L\varepsilon \approx 0{,}2 \text{ мм}, \qquad (1.16)$$

где L — расстояние наилучшего зрения (250 мм); ε — предельное угловое разрешение глаза при работе без напряжения ($\sim 3'$).

Если зазор между отметками совмещения δ положить равным разрешающей способности микроскопа, то минимальное увеличение микроскопа, позволяющее выполнять совмещение с точностью $\pm\delta$, определится отношением

$$\Gamma_{min} = a/\sigma = a/\delta. \qquad (1.17)$$

Из (1.15) и (1.17) следует, что увеличение микроскопа пропорционально апертуре A. Практически полезное увеличение микроскопа лежит в пределах 500—1000 A. Однако требование большого (или даже среднего) увеличения микроскопа противоречит требованиям большого рабочего расстояния и достаточной глубины резкости и не позволяет получить большую разрешающую способность.

Рабочее расстояние микроскопа должно быть больше толщины фотошаблона, которая для обеспечения его жесткости берется в пределах 4—10 мм. При увеличении апертуры рабочее расстояние убывает и при $A=0{,}7$ может составлять десятые доли миллиметра.

Глубина резкости должна перекрывать зазор между пластиной и фотошаблоном, который создается в процессе совмещения, чтобы исключить трение между ними и сохранить качество фотошаблона. В зависимости от механизма создания микрозазора он может составлять 5—100 мкм. В то же время глубина резкости T обратно пропорциональна квадрату апертуры ($T \approx \approx \lambda/A^2$) и при больших апертурах (0,5—0,7) составляет 1,6—0,8 мкм.

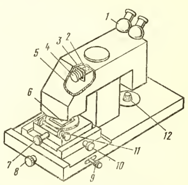


Рис. 1.35. Схема установки совмещения и экспонирования:

1 — бинокулярный микроскоп; *2* — лампа УФ-излучения; *3* — диафрагма; *4* — конденсор; *5* — зеркало; *6* — фотошаблон; *7*, *10*, *11* — механизмы точного перемещения фотошаблона; *8* — механизм подъема пластины; *9* — механизм грубого поворота пластины; *12* — манипулятор-пантограф грубого перемещения пластины

Ввиду рассмотренных ограничений точность современных установок совмещения лежит в пределах 0,5—2 мкм.

Большому увеличению микроскопа сопутствует также малое поле зрения. Поэтому целесообразно применять микроскопы с расщепленным (двойным) полем зрения, позволяющие одновременно наблюдать два противоположных края пластины.

На рис. 1.35 представлена схема установки для совмещения и экспонирования. Основные ее части — манипулятор, устройство визуального контроля и осветитель экспонирования. Манипулятор содержит точные винтовые передачи перемещения фотошаблона в двух взаимно перпендикулярных направлениях и поворота вокруг вертикальной оси, а также механизмы грубых перемещений пластины. Пластина прижимается вакуумным присосом к площадке с шаровой пятой, обеспечивающей самоуста-

новку пластины по плоскости фотошаблона. В процессе совмещения между пластиной и фотошаблоном устанавливают минимальный гарантированный зазор. После совмещения этот зазор выбирают с помощью механизма, поднимающего пластину до упора в плоскость фотошаблона. Устройство визуального контроля (бинокулярный микроскоп) и осветитель (лампа УФ-излучения) монтируют обычно на общем кронштейне, имеющем вертикальную ось вращения. При повороте кронштейна микроскоп отводится, а осветитель занимает его место.

Технические характеристики установки ЭМ-512

Размеры пластины:	
диаметр	40 мм
толщина	0,1—0,8 мм
Размеры фотошаблона	70×70 мм
Толщина фотошаблона	4—10 мм
Точность совмещения	1 мкм
Производительность	50 пластин/ч
Увеличение микроскопа	35*, 70*, 140*, 240*
Поле зрения микроскопа	6,8; 3,4; 1,7; 0,9 мм
Экспозиция	0,2—100 с
Точность экспозиции	0,1 с
Питание сжатым воздухом	3—4 ат, 0,3 м³/ч
Габариты	960×885×1150 мм
Масса	140 кг

Установка совмещения и экспонирования ЭМ-512 снабжена микроскопом с расщепленным полем зрения и специальным микроманипулятором, имеющим тонкую и грубую подачу.

Важнейшими параметрами процесса экспонирования являются освещенность рабочего поля и время экспонирования. Диаметр поля экспонирования в современных установках должен составлять 50—60 мм, а разброс освещенности по всему полю не должен превышать 5—10%. Ртутные лампы высокого давления (типа ДРШ) со временем меняют спектральный состав, интенсивность и распределение освещенности по полю, что вызывает колебания размеров элементов ±0,2 мкм.

Для определенной освещенности, типа фоторезиста и его толщины выбирают соответствующее время экспонирования, которое должно воспроизводиться от пластины к пластине с достаточно высокой точностью. Известно, например, что при экспонировании с выдержкой 20 с$\pm$$\pm$10% дополнительные колебания размеров элементов $\pm$0,2 мкм.

Проявление негативных фоторезистов заключается в растворении незадубленных участков в растворителях, на основе которых приготовлен фоторезист. Проявление позитивных фоторезистов представляет собой химическую реакцию, связанную с превращением кислот в растворимые соли. Для фоторезиста ФП-383 используют тринатрийфосфат $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ (20 грамм на 1 л деионизованной воды). Перспективными в отношении производительности и качества являются распыление тринатрийфосфата и обработка в парах органического растворителя (для негативных фоторезистов).

Для повышения кислотоустойчивости после отмывки пластин производят тепловое дубление фотомаски при температуре 210—240° С в течение 0,5—1 ч.

Визуальный контроль качества рисунка фотомаски осуществляют с помощью микроскопов ММИ-4 или ММУ-1.

Травление. Травители, используемые при фотолитографии, должны удовлетворять требованию избирательности, т. е., растворяя данный слой, они не должны воздействовать на нижележащий материал основания. Скорость (время) травления должна быть согласована с толщиной фотомаски, чтобы обеспечить ей необходимую стойкость.

В производстве полупроводниковых ИС 80% операций фотолитографии выполняют на слое двуокиси кремния. Растворителем для SiO_2 является плавиковая кислота

$$SiO_2 + HF \rightarrow SiF_4\uparrow + H_2O$$

Выделяющийся при этом газообразный четырехфтористый кремний приводит к растрескиванию и отслаиванию фотомаски по контуру рисунка и, как следствие этого, к растравливанию окисла кремния.

Это явление отсутствует при использовании буферного травителя, в который помимо плавиковой кислоты вводят раствор фтористого аммония. Присутствие в растворе

избытка ионов фтора позволяет связать фтористый кремний в прочный комплекс SiF_6.

Один из рекомендуемых составов буферного травителя — $HF : NH_4F : H_2O = 2 : 7 : 1$. Полное удаление окисла может быть определено по изменению интерференционных цветов или по характеру смачивания поверхности пластины-свидетеля.

Перспективным с точки зрения автоматизации является процесс травления в парах плавиковой кислоты.

Для травления кремния используют различные сочетания азотной и плавиковой кислоты. Процесс травления состоит из двух параллельных процессов: окисления кремния (окислитель — азотная кислота) и растворения двуокиси кремния (растворитель — плавиковая кислота). С увеличением относительного содержания плавиковой кислоты скорость травления возрастает, но кислотоустойчивость фоторезиста падает.

В процессе травления кремния имеют место следующие реакции:

$$Si + HNO_3 \rightarrow SiO_2 + NO_2 + H_2O$$

$$SiO_2 + HF \rightarrow H_2SiF_6 + H_2O$$

Скорость образования двуокиси кремния должна быть ниже скорости образования кремнефтористоводородной кислоты для непрерывного удаления SiO_2 с поверхности. С этой целью в состав травителя добавляют замедлитель процесса окисления — уксусную кислоту (CH_3COOH).

В зависимости от характера рельефа и содержания плавиковой кислоты применяют медленные травители (для мелких рельефов, скорость травления около 0,1 мкм/мин) и быстрые травители (для глубоких рельефов, 4—8 мкм/мин). Соотношение компонентов $NH_3 : HF : CH_3COOH$ для мелких рельефов может быть рекомендовано 7 : 1 : 3, для глубоких — 3 : 1 : 1.

Применяемый в качестве пассивной пленки нитрид кремния травится в 50%-ной плавиковой кислоте или горячей ортофосфорной кислоте, а также в буферном травителе $NF : NH_4F$ (40%): HF (50%) = 1 : 10 : 1. Скорость травления пиролитически осажденных пленок лежит в пределах 150—600 Å/мин.

Пленки алюминия при маскировании их негативным фоторезистом на основе поливинилциннамата тра-

вятся в разбавленном (20%) растворе щелочи (KOH или NaOH) при $t=60-90°$ C:

$$Al + NaOH + H_2O \rightarrow Na[Al(OH)_4] + H_2$$

При использовании маски на основе нафтохинондиазида, имеющего низкую стойкость против щелочей, целесообразно применять 50%-ную ортофосфорную кислоту H_3PO_4 (при $t=60-70°$ C).

Золото обычно травят в составе $HCl : HNO_3 = 3 : 1$ («царская водка»). При этом протекают следующие процессы:

$$HCl + HNO_3 \rightarrow Cl + NOCl + H_2O$$
$$Au + Cl + NOCl \rightarrow AuCl_3 + NO$$
$$AuCl_3 + HCl \rightarrow H[AuCl_4]$$

При изготовлении фотошаблонов прибегают к процессу избирательного травления хрома. Рекомендуемым травителем является 50%-ный раствор соляной кислоты. Процесс протекает в две стадии:

$$Cr + HCl \rightarrow CrCl_2 + H_2$$
$$CrCl_2 + HCl \rightarrow CrCl_3 + H_2$$

После процессов травления и отмывки пластин от следов травителя защитную фотомаску удаляют. Удаление маски успешно осуществляется различными концентрированными кислотами. Универсальным способом удаления фотомаски (негативных и позитивных фоторезистов) является двух- и трехкратное кипячение (по 5—10 мин) в концентрированной серной кислоте или в «хромовой смеси» (серная кислота H_2SO_4 и двухромовокислый калий $K_2Cr_2O_7$). Для удаления маски после травления металлов используют кипячение в органических растворителях (например, трихлорэтилене).

Для выполнения операций травления, отмывки и сушки пластин созданы полуавтоматические установки, например, со следующими техническими характеристиками:

Производительность	20 пластин/ч
Количество одновременно обрабатываемых пластин	5 шт.
Дозировка травителей	автоматическая
Температура нагрева ванны с травителем	$(40 \div 90) \pm 3°$ C

Время травления:	
металла	3 мин±15%
окисла	15 мин±15%
Температура нагрева воздуха для сушки пластин	50—70° С
Скорость вращения центрифуги при сушке	1500 об/мин
Расход деионизованной воды при распылении	1—1,5 л/ч
Расход обеспыленного воздуха при давлении 1,5 ат	5 м³/ч
Максимальная потребляемая мощность	4 кВт
Габаритные размеры (со шкафом управления)	1660×1370×1750 мм
Масса	960 кг

Таблица 1.10

Удельное сопротивление воды в зависимости от способа очистки

Способ очистки	Удельное сопротивление при 20° С, Ом·см
Московский водопровод	$(3-6)\cdot10^3$
Дистилляция в стеклянной аппаратуре	$(1-2)\cdot10^5$
Бидистилляция в кварцевой или луженой аппаратуре	$(3-6)\cdot10^5$
Деионизация с помощью двухступенчатых ионообменных установок .	$(1-8)\cdot10^6$
Деионизация с помощью нескольких колонок со смешанными смолами (финишные установки)	$(1-2)\cdot10^7$
Полностью деионизованная вода (теоретическая величина)	$2{,}2\cdot10^7$

Отмывка пластин. Отмывая пластины, удаляют с поверхности механические загрязнения (пыль, абразивные частицы, частицы разрушенного материала), а также следы неорганических соединений, растворимых в воде (травители). Чтобы получить поверхность высокой химической чистоты, используют сверхчистую воду, содер-

жащую минимальное количество растворенных неорганических соединений. В результате растворения солей в исходной воде содержатся ионы различных металлов и кислотных остатков. Поэтому воду, освобожденную от этих ионов, называют деионизованной (обессоленной). Процесс удаления ионов металлов и кислотных остатков называют деионизацией.

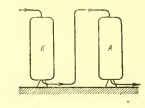


Рис. 1.36. Общая схема установки для деионизации воды

О степени очистки (деионизации) воды проще всего судить по удельному сопротивлению воды. В табл. 1.10 приведена сравнительная оценка удельного сопротивления воды в зависимости от способа очистки.

Конечное значение сопротивления полностью деионизованной воды объясняется собственной электропроводностью воды при данной температуре за счет частичной диссоциации молекул воды.

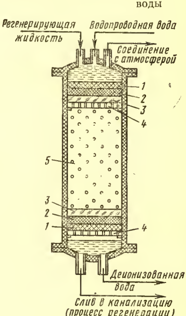


Рис. 1.37. Ионообменная колонка:
1 — крупный кварц; *2* — кварц среднего размера; *3* — мелкий кварц; *4* — решетка из винипласта; *5* — ионообменная смола (гранулированная)

Деионизация заключается в пропускании воды через специальные ионообменные смолы и последовательное связывание катионов и анионов растворенных солей. На рис. 1.36 представлена простейшая схема установки для деионизации воды. При прохождении водопроводной воды сверху вниз через колонку, напол-

ненную катионообменной смолой (К), происходит замена положительно заряженных ионов металлов на ионы водорода H^+. При этом реакция воды становится кислой: из колонки вытекает слабый раствор кислот. Проходя далее через колонку, наполненную анионообменной смолой (А), вода получает ионы OH^-, отдавая взамен смоле отрицательно заряженные ионы кислотных остатков (анионы). В результате вместо растворенных солей образуется эквивалентное количество чистой воды ($H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$).

На рис. 1.37 изображен продольный разрез ионообменной колонки. Более двух третей объема колонки занимает ионообменная смола в виде гранул размером 0,4—0,6 мм. В связи с тем что ионообменные смолы постепенно истощаются анионами OH^- и катионами H^+, для повышения эффективности деионизации применяют многоступенчатые установки, где вода проходит несколько циклов обработки. Кроме того, ионообменные смолы периодически подвергают регенерации, заключающейся в обработке катионита кислотой (перевод его в Н-форму) и анионита щелочью (перевод в ОН-форму). Между регенерациями очищается примерно 20 000 л воды. Однако это зависит от качества исходной воды (например, вода ленинградского водопровода содержит в 8 раз меньше загрязняющих ионов, чем московского).

Технические характеристики устаиовки фииишной очистки деиоиизоваиной воды УФ-500

Производительность	250 л/ч
Ионообменная смесь	смолы КУ2-84 и АВ-174 в соотношении 1 : 4
Количество ионообменных колонок	2 шт.
Удельное сопротивление воды:	
на входе в установку	1—2 МОм·см
на выходе нз установки	20 МОм·см
Установленная мощность	30 Вт
Габаритные размеры	550×550×1500 мм
Масса	50 кг

Высокое качество отмывки достигается при обработке пластин в протоке деионизованной воды во многосекционных ваннах (рис. 1.38). Кассеты с пластинами периодически переносятся из секции в секцию против тока воды. Сигналом к окончанию промывки в данной секции служит достижение водой сопротивлений, примерные вели-

чины которых указаны на рисунке. Сопротивление воды измеряется электролитическими ячейками, в которых имеется нормированный объем воды.

Краткие сведения об изготовлении фотошаблонов. Изготовление комплекта фотошаблонов — это наиболее сложный этап подготовки производства полупроводниковых ИС. Высокая точность элементов рисунка и относи-

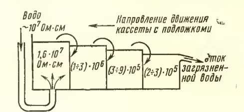


Рис. 1.38. Схема многосекционной промывочной ванны

тельного расположения отдельных рисунков на групповом фотошаблоне (до нескольких десятых долей микрометра) обусловливает большую трудоемкость изготовления и высокую стоимость комплекта фотошаблонов. Последнее часто служит экономическим препятствием при организации мелкосерийного производства ИС.

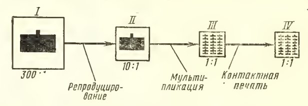


Рис. 1.39. Схема процесса изготовления группового фотошаблона:

I — фотооригинал; *II* — промежуточный негатив; *III* — эталонный фотошаблон; *IV* — рабочий фотошаблон

Упрощенная схема процесса изготовления группового фотошаблона представлена на рис. 1.39.

К ф о т о о р и г и н а л у предъявляются следующие основные требования:

1) точность изображения, обеспечивающая (с учетом масштаба) заданную точность элементов рисунка на фотошаблоне;

2) постоянство размеров при колебаниях температуры и влажности окружающей среды;

3) высокая контрастность;

4) возможность репродуцирования в проходящем свете, что обеспечивает равномерную освещенность по всему полю изображения.

Перечисленные требования достаточно хорошо удовлетворяет метод скрайбирования. Стеклянное основание покрывают методом пульверизации сплошной непрозрачной пленкой. Широко используют, например, черную нитроэмаль «Экстра». Главное требование к покрытию — его сплошность, т. е. отсутствие точечных прозрачных дефектов. После сушки слоя и контроля пластину устанавливают на стол координатографа. Координатограф снабжен устройствами точного отсчета координат и резцовой головкой. Сущность метода скрайбирования — нанесение на пленку рисок, очерчивающих контуры элементов топологического рисунка, и последующее удаление пленки с пробельных мест.

Примером установки для изготовления фотооригиналов может служить координатограф с цифровым программным управлением ЭМ-703. Координатограф предназначен для автоматического вычерчивания (вырезания) контуров, очерченных прямыми линиями и дугами окружностей. Входная информация представляется в двоично-десятичном коде на перфоленте.

Установка состоит из устройства подготовки данных, устройств фотоввода данных с перфоленты, устройства управления, шкафа питания привода и координатного стола (требуемая площадь для размещения 5×6 м^2). Координатный стол имеет рабочее поле 1200×1200 мм. Привод кареток выполнен на двигателях постоянного тока. Жесткость конструкции стола, наличие точных винтов с механизмами коррекции и фотоэлектрических датчиков обратной связи обеспечивают точность резания по каждой из координат в пределах $\pm 0{,}05$ мм.

Для программирования движения по прямой линии задаются координаты начальной точки и величины перемещений (разности координат) по осям.

Для программирования движения по дуге окружности задаются координаты начальной точки относительно центра дуги, алгебраическую разность координат конечной и начальной точек перемещения и направление обхода дуги. Полная окружность задается только коорди-

натами точки начала движения относительно центра этой окружности.

Дискретность задаваемых перемещений 0,01 мм. Максимальные скорости перемещений: на прямолинейных участках 5,5 м/мин, на дугах окружностей 1,5 м/мин.

Возможности установки расширены за счет встроенного линейно-кругового интерполятора, который обеспечивает выполнение практически любого контура.

Репродуцирование — это уменьшение масштаба изображения (обычно до 10:1). Для получения высокой разрешающей способности важное значение имеет согласование по спектральной чувствительности источника освещения и фотослоя, а также сведение хроматической аберрации к минимуму. Для репродуцирования используют фотоэмульсии высокой разрешающей способности (1700—1800 лин/мм). Источниками освещения служат лампы ультрафиолетового света (ртутно-кварцевые и ксеноновые). Экспонирование происходит в проходящем свете через диффузионный экран, обеспечивающий равномерное освещение поля фотооригинала (неравномерность яркости не хуже 10% при яркости 2000—5000 нт). Репродукционная фотокамера ЭМ-503А, например, позволяет производить съемку в масштабе 1:10, 1:20 и 1:30. Время экспозиции 1—1000 с. Установка имеет соответствующую жесткую массивную конструкцию и виброизоляцию.

Мультипликация представляет собой процесс многократного повторения топологического рисунка на общей фотопластине с одновременным уменьшением изображения до натуральных размеров. После проявления и задубливания получают матрицу идентичных рисунков, т. е. групповой фотошаблон. Операцию выполняют на фотоштампах (фотоповторителях) — установках, снабженных неподвижной оптической проекционной системой (обращенный микроскоп) и механизмами точного продольного и поперечного перемещения фотопластины. После установки контура спроектированного изображения параллельно направлению перемещения стола осуществляют экспонирование первого изображения. Затем стол с фотопластиной перемещают на шаг и экспонируют второе изображение и т. д. После экспонирования первой строки стол смещают на шаг в поперечном направлении и экспонируют изображения второй строки и т. д. При неизменной настройке оптической системы главное тре-

бование к данной операции сводится к обеспечению высокой точности шага расположения изображений в пределах строк и между строками, так как от этого зависит совмещаемость фотошаблонов, входящих в комплект. Установка ЭМ-505, предназначенная для мультипликации, позволяет получить масштабы уменьшения 1 : 10, 1 : 5 и 1 : 2. Точность перемещения стола ±2 мкм. Перемещение стола по продольной координате автоматическое, по поперечной — ручное.

Для улучшения совмещаемости фотошаблонов используют многоместные фотоштампы, состоящие из нескольких проекционных оптических систем, объединенных общим координатным столом (например, установка ЭМ-510). При одновременном изготовлении всех шаблонов комплекта ошибки перемещения стола оказываются одинаковыми для всех фотошаблонов и не влияют на точность совмещения изображений отдельных шаблонов. Однако требование идентичности настройки проекционных систем при этом возрастает. Возрастают также требования к прямолинейности перемещений по осям X и Y.

Многоместные фотоштампы позволяют достичь совмещаемости комплекта фотошаблонов ±1 мкм и заметно повысить производительность процесса мультипликации.

Технические характеристики фотоштампа ЭМ-510

Число позиций	9
Масштаб уменьшения	10ˣ
Размеры пластинок оригиналов (промежуточных негативов)	60×60 мм
Размер изображения оригинала	Не более 25×25 мм
Максимальный ход стола:	
в продольном направлении	60 мм
в поперечном направлении	50 мм
Совмещаемость комплекта фотошаблонов, экспонированных одновременно	±0,001 мм
Шаг мультипликации в автоматическом режиме	0,01—5 мм
Дискретность шагов	0,01 мм
Цена деления отсчетных лимбов	0,001 мм
Поле пластинки, покрываемое изображениями	40×40 мм
Экспозиция	0,5—999,9 с
Габариты	2100×920×1900 мм
Масса	650 кг

Одним из факторов, ухудшающих совмещаемость фотошаблонов, изготовленных на многоместных фотоштампах, является непрямолинейность направляющих стола, которая обусловливает различные линейные смещения и развороты изображений в разных позициях фотоштампа. При использовании аэростатических направляющих достигается прямолинейность хода кареток не хуже 0,1 мкм. Другим фактором (как и в одноместном фотоштампе) является погрешность базирования изображения оригинала относительно направления перемещения в каждой позиции фотоштампа. Разворот изображений, одинаковый в пределах одного фотошаблона, оказывается различным в различных фотошаблонах комплекта, что и ухудшает их совмещаемость.

Полученные на этапе мультипликации эмульсионные фотошаблоны имеют механически непрочное изображение и могут выдержать лишь 20—30 контактных отпечатков. Поэтому их рассматривают как эталонные фотошаблоны, с которых затем снимают копии — рабочие фотошаблоны. Рабочий шаблон получают путем напыления на стеклянную пластину сплошной пленки хрома (порядка 1000Å) с мелкозернистой структурой и проведения по этой пленке фотолитографии, включающей в себя контактную фотопечать с эмульсионного эталонного фотошаблона. При этом происходит некоторая потеря точности. Износостойкое хромовое покрытие позволяет получить до 1000 отпечатков без заметного снижения качества рисунка. Конструкция рабочего фотошаблона и основные требования к нему представлены на рис. 1.30.

Наличие воздушных промежутков между металлизированными участками фотошаблонов приводит к образованию воздушных зазоров при наложении фотошаблона на кремниевую пластину, покрытую фоторезистом. Это снижает разрешающую способность процесса формирования скрытого изображения на этапе экспонирования из-за преломления света на границах «стекло — воздух» и «воздух — фоторезист». Один из способов ослабления этого явления заключается в заполнении воздушных промежутков фотошаблона фоторезистом *. С этой целью на металлизированную сторону фотошаблона наносят негативный фоторезист. После сушки фоторезиста осуществляют экспонирование с обратной стороны фотошабло-

* Патент США № 3676002, заявл. 30.06.69.

на, причем маской служит металлизированный рисунок. После проявления фоторезист остается лишь в промежутках металлизированного рисунка. Небольшое превышение толщины фоторезиста над толщиной хромового покрытия обеспечивает минимально необходимый зазор, предохраняющий металлизированный рисунок от контакта с пластиной при экспонировании. Коэффициенты преломления света для фоторезистов на фотошаблоне и на пластине должны иметь близкие значения.

Тенденции развития фотолитографии. Основные направления совершенствования процесса фотолитографии определяются следующими задачами:

1) снижение трудоемкости и стоимости изготовления фотошаблонов;

2) уменьшение размеров элементов ИС, т. е. повышение разрешающей способности процесса фотолитографии в целом;

3) повышение точности совмещения перед экспонированием и сокращение трудоемкости этой операции.

Решение этих задач тесно взаимосвязано. Например, повышение разрешающей способности процесса позволяет исключить некоторые промежуточные этапы в производстве фотошаблонов, а уменьшение размеров элементов ИС повышает требования к точности совмещения. С точки зрения автоматизации изготовления фотооригиналов, повышения производительности и исключения субъективных ошибок оператора перспективен метод цифрового программированного управления. При этом координаты отрезков, составляющих контуры элементов рисунка, фиксируются на перфорированной ленте, управляющей движением резцовой скрайбирующей головки.

Для получения фотошаблонов используют растровые системы (линзовые и безлинзовые). Этот метод позволяет с фотооригинала за одну операцию съемки получить матрицу идентичных изображений, уменьшенных до натуральной величины, исключив таким образом предварительное репродуцирование и, что особенно важно, трудоемкое мультиплицирование. Растровая фотокамера ЭМ-514 позволяет, например, с помощью линзового растрового объектива производить в проходящем свете съемку фотооригинала размером 300×300 мм с уменьшением в 200—300 раз. Получаемое при этом рабочее поле фотошаблона составляет в диаметре 40 мм, а размеры отдельных изображений 0,8; 1,0 и 1,25 мм в зависимости

от масштаба съемки. Недостаток растрового способа — невысокая разрешающая способность системы «объектив — фотопластина», убывающая от центра поля к его краю (на фотоматериалах типа «Коллодион» — 250—300 лин/мм).

Совершенствуя процесс производства фотошаблонов, используют микрофотонаборные установки с программным управлением. В микрофотонаборных установках топологический рисунок на заготовке со светочувствительным покрытием формируется путем последовательного проекционного экспонирования простейших элементов, форма и координатное положение которых определяется программой.

В установке ЭМ-519 простейший элемент прямоугольной формы (прямоугольная диафрагма) образуется двумя неподвижными и двумя подвижными заслонками. Перемещения последних имеют дискретность 10 мкм и осуществляются по программе. С дискретностью 0,5° диафрагма может быть развернута по заданной программе на угол ±45°. Координатное положение «впечатанного» элемента определяется перемещением заготовки в соответствии с программой (точность установки координат ±1,5 мкм). Таким образом получают промежуточный негатив (10 : 1).

Сочетая микрофотонаборные установки с растровой проекционной системой, можно получить групповой фотошаблон, минуя этапы изготовления фотооригинала, репродуцирования и мультиплицирования (установка ЭМ-508).

Высшей формой автоматизации производства фотошаблонов является автоматическое их изготовление по программе, получаемой от ЦВМ, выполняющей функции проектировщика топологии. Подобные системы эффективны прежде всего при получении фотошаблонов для межсоединений в больших интегральных схемах, изготавливаемых методом избирательного монтажа (см. § 1.7).

Для уменьшения размеров элементов ИС должна быть повышена разрешающая способность экспонирования на всех этапах фотолитографии и изготовления фотошаблонов. Поэтому актуальными являются поиск фоторезистов с более высокой разрешающей способностью, совершенствование процессов травления (в частности, замена химического травления ионным «травлением» в плазме ВЧ-тлеющего разряда, исключающим подтравливание), от-

каз от контактной печати и переход к проекционной, обладающей более высокой разрешающей способностью, с одновременным совершенствованием оптики.

Определенные надежды возлагаются на использование голографических методов в фотолитографии. Так, достигнуты некоторые успехи по применению голограмм фотошаблонов для проекционного (бесконтактного) экспонирования фоторезиста на полупроводниковых пластинах. При этом получают высокую разрешающую способность (около 1 мкм) на большом поле без применения объектива.

Существенной особенностью изображения, получаемого при восстановлении голограммы, является малая чувствительность к дефектам голограммы (царапины, включения и т. д.), которые создают лишь небольшой общий фон по всему полю изображения.

Другая важная особенность голографического метода — зависимость масштаба восстановленного изображения от длины волны когерентного света, которым облучается голограмма. С уменьшением длины волны масштаб изображения уменьшается. Применяя при восстановлении источник излучения с более короткой волной, чем при получении голограммы, обеспечивают уменьшение изображения по сравнению с исходным фотошаблоном.

Голографический метод успешно применяют также для размножения единичного изображения с помощью специального растра-голограммы (Фурье-голограммы). В результате имеют голограмму мультиплицированного фотошаблона, путем восстановления которой получают при экспонировании фоторезиста матрицу изображений высокой точности относительного расположения и высокого разрешения по всему полю.

Для использования голографии в производстве ИС предстоит решить ряд сложных задач. Прежде всего необходимо создать мощные и стабильные в работе источники когерентного УФ-излучения, разработать для голограмм специальные чувствительные материалы с высокой разрешающей способностью (свыше 2000 лин/мм).

Следует решить проблему помехоустойчивости при голографировании. Так, например, вибрации с амплитудой более $\lambda/4$ в процессе голографирования недопустимы. Деформации голограммы в процессе обработки и хранения также не должны превышать $\lambda/4$.

Однако обычная оптика имеет теоретический предел разрешения, равный 0,11 мкм, что соответствует половине длины волны коротковолновой границы светового диапазона. Переход на более короткие волны для повышения разрешающей способности связан с освоением электронных пучков с теоретическим разрешением 10—100 Å.

В основе электронолитографии лежит взаимодействие электронного пучка с резистом, разрыв межатомных связей в материале резиста и перестройки его структуры, в результате чего способность резиста к растворению в определенных составах (проявителях) резко изменяется: для негативных — уменьшается, для позитивных — возрастает.

Разрешающая способность электронной оптики, как и световой, зависит от длины волны облучения. Длина волны λ[Å] электрона, ускоренного электрическим полем с разностью потенциалов V[В], определяется соотношением

$$\lambda = \sqrt{\frac{150,5}{V}}. \qquad (1.18)$$

При $V = 15 \cdot 10^3$ В, например, $\lambda = 0,1$ Å.

Глубина проникновения электронов δ в различные материалы зависит от энергии электронов и плотности материала и определяется следующим эмпирическим выражением:

$$\delta = 10^{-5} \cdot \frac{E^{3/2}}{\rho}, \qquad (1.19)$$

где E — энергия электронов, кэВ; ρ — плотность материала, г/см^3.

Выражение (1.19) справедливо в диапазоне энергий 0,5—3000 кэВ.

Важным параметром, определяющим производительность процесса экспонирования, является доза экспонирования Q, необходимая для полной перестройки резиста на всю толщину h. Дозу экспонирования Q [Кл/см^2] можно определять по следующим эмпирическим формулам:

для негативных резистов·

$$Q = J_{\text{н}} t = 3,06 \cdot 10^{-8} \cdot h + 2,4 \cdot 10^{-6}; \qquad (1.20)$$

для позитивных резистов

$$Q = J_п t = 2{,}6 \cdot 10^{-7} \cdot h + 6{,}6 \cdot 10^{-5}, \qquad (1.21)$$

где $J_п$ — плотность электронного тока пучка, А/см²; t — время экспонирования, с; h — толщина экспонированного слоя резиста, нм.

Разрешающую способность электронно-лучевого экспонирования можно оценить по минимальному диаметру электронного пучка d [см] в плоскости фокусировки:

$$d = (4C)^{1/4} \left(\frac{I_п kT}{\pi J_э E} \right)^{3/8}, \qquad (1.22)$$

где C — коэффициент сферической аберрации (для различных конструкций электронно-оптических систем лежит в пределах 5—10^4); $I_п$ — ток пучка, А; $J_э$ — плотность тока эмиссии катода, А/см²; T — абсолютная температура катода, K; E — энергия электронов, эВ; k — постоянная Больцмана, эВ/К.

Из формулы (1.22) следует, что при неизменной величине сферической аберрации минимальный диаметр пучка увеличивается с увеличением тока пучка и уменьшается с увеличением плотности тока эмиссии $J_э$ и энергии электронов E. Расчет по приведенной формуле при $C = 10^2$, $I_п = 10^{-8}$ А, $T = 3000$ К, $J_э = 5$ А/см² и $E = 30$ кэВ дает $\delta = 0{,}21$ мкм.

В действительности ширина линии при экспонировании перемещающимся электронным пучком больше расчетной вследствие рассеяния электронов в фоторезисте и отражения их от подложки. Исследованиями установлено, что ширина линии возрастает по сравнению с расчетной на величину, примерно равную толщине фоторезиста. Как и в случае фотолитографии, минимальная толщина резиста ограничена дефектами пленки резиста и стойкостью ее к травителям.

При электронно-лучевом экспонировании важным фактором, определяющим требования к глубине резкости, становится макрогеометрия полупроводниковой пластины. Отклонения от идеальной плоскости могут достигать 10 мкм. Однако электронно-лучевое экспонирование характеризуется величиной λ, на несколько порядков меньшей, чем при фотолитографии. Это позволяет добиться высокой разрешающей способности при малых апертурах. В результате глубина резкости сфокусирован-

ного электронного пучка может составлять 25—100 мкм, что позволяет получать одинаково резкие изображения и на искривленной поверхности полупроводниковой пластины.

На рис. 1.40 приведена схема установки для электронно-лучевого экспонирования. Термоэмиссионный катод *1*, управляющий электрод *2* и анод *3* образуют устройство формирования электронного луча — электронную пушку. Диаметр эмиттирующей поверхности катода равен примерно 100 мкм. За счет электростатической фокусировки в пушке диаметр электронного луча уменьшается примерно до 30 мкм.

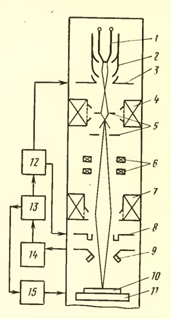


Рис. 1.40. Схема установки электронно-лучевого экспонирования методом сканирования

Ускоренные и сфокусированные электроны проходят сквозь отверстие в аноде и движутся далее в эквипотенциальном пространстве с постоянной скоростью. Короткофокусная магнитная линза *4* фокусирует луч в пятно диаметром примерно 0,5 мкм. При этом пучок электронов обрезается диафрагмами *5*, облегчающими фокусировку за счет отражения краевых рассеянных электронов. Устройство с корректирующими катушками (стигматор) *6* позволяет исправлять поперечное сечение луча до правильного круга в тех случаях, когда возникает искажение формы из-за дефектов изготовления полюсных наконечников магнитных линз.

Для увеличения рабочего расстояния (до 80—150 мм) и увеличения площади обработки установлена длиннофокусная магнитная линза *7*, которая переносит уменьшенное изображение источника электронов на подложку *10* в масштабе, близком 1 : 1. Для сканирования луча используется устройство управления сканированием *12*,

воздействующее на отклоняющую систему *8*, а также на электронную пушку для «запирания — отпирания» луча.

Вследствие ограниченной площади сканирования обработка ведется отдельными кадрами, для чего столик *11* с подложкой снабжен системой точных перемещений *15*. Установка подложки в нулевое положение относительно луча (начало сканирования) осуществляется автоматическим совмещением луча со специальными реперными метками. Момент совмещения фиксируется детектором отраженных электронов *9*, а соответствующий сигнал усиливается и формируется устройством *14*.

Работа установки по заданной программе осуществляется устройством управления *13*.

Примером установок подобного типа может служить отечественная электронно-лучевая установка высокого разрешения (ЭЛУВР), предназначенная для изготовления (экспонирования) фотошаблонов полупроводниковых ИС с минимальными размерами элементов 1 мкм и несовмещаемостью слоев 1 мкм. Программное перемещение луча осуществляется от ЭВМ.

Технические характеристики установки ЭЛУВР

Ускоряющее напряжение	20 кВ
Максимальный ток луча на объекте	10^{-8} А
Яркость пушки	$7 \cdot 10^4$ А/см^2·страд
Поле экспонирования (кадра)	2×2 мм
Диаметр луча:	
при максимальном токе	
в центре поля	0,5 мкм
на краю поля	0,8 мкм
при минимальном токе (5×10^{-10} А)	
в центре поля	0,2 мкм
на краю поля	0,3 мкм
Дисторсия на поле 2×2 мм . .	0,5 мкм

Управление током луча может осуществляться с помощью фотокопировального устройства (рис. 1.41). Сигналы развертки одновременно управляют разверткой луча как в электронно-лучевой установке (ЭЛУ), так и на специальном кинескопе с помощью отклоняющей системы *1*. При этом луч сканирует по площади экрана. Светящаяся точка с экрана кинескопа *2* с помощью объектива *3* фокусируется в плоскость фотошаблона *4*. Фотошаблон содержит увеличенный рисунок, который необходимо экспонировать на обрабатываемой пластине-

подложке. За фотошаблоном помещается линза *5* и фотоэлектронный умножитель *6*, считывающий сигнал яркости точки, сканирующей фотошаблон *4*. После соответствующего усиления этот сигнал управляет включением и выключением электронного луча установки. В результате экспонируются только те участки резиста, которые в заданном масштабе соответствуют прозрачным участкам фотошаблона.

Площадь экспонирования методом сканирования сфокусированного электронного луча ограничена сферической аберрацией электронно-оптической системы и для систем с разрешением порядка 0,3 мкм не превышает площади диаметром 5 мм.

Другой существенный недостаток метода сканирования — значительное время экспонирования, которое увеличивается с повышением разрешающей способности (уменьшением тока пучка), что следует из формул (1.20) — (1.22).

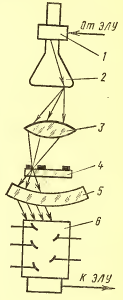


Рис. 1.41. Схема фотокопировального устройства

Этих недостатков не имеет проекционный метод экспонирования. Роль шаблона, несущего на себе рисунок, играет специальный трехслойный фотокатод (рис. 1.42). Основанием фотокатода является кварцевая отполированная пластина *1*, на которую напыляется пленка титана *2*. Оптическим методом или сканированием электронного луча на пленке титана выполняется литография и создается необходимый рисунок в масштабе 1 : 1. Оставшиеся участки титановой пленки оксидируются до двуокиси титана, хорошо поглощающей ультрафиолетовый свет. Затем напыляется слой палладия *3* толщиной около 40 Å, который является хорошим фотоэмиссионным материалом.

При облучении шаблона ультрафиолетовым светом со стороны основания неэкранированные двуокисью титана участки палладия испускают электроны, энергия которых составляет десятые доли электрон-вольта. В промежутке

фотокатод — подложка, составляющем расстояние порядка 10 мм, создается электрическое поле напряженностью 10 кВ/см, а также однородное магнитное поле напряженностью 1000 Гс. В результате совместного действия электрического и магнитного полей и в соответствии с рисунком шаблона формируется поток электронов высокой энергии на слой электронорезиста *4*, покрывающего подложку *5*.

Метод проекционного электронного экспонирования реализован в установке фирмы RES (США). Блок катушек располагается вне вакуумной камеры. Подложки и фотокатоды вводятся в камеру в кассетах (емкостью 80 и 40 соответственно). Поштучный ввод подложек и фотокатодов в технологическую камеру осуществляется без нарушения вакуума. Время обработки одной подложки около 15 с. Минимальная ширина элементов, воспроизводимых на установке, 1 мкм.

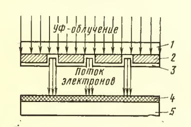


Рис. 1.42. Схема проекционного электронного экспонирования с помощью фотокатода

Выполнено немало работ по получению изображений с высокой разрешающей способностью путем облучения кремниевой пластины. При этом процесс проводился как на специальном электронорезисте, не обладающем светочувствительностью, так и непосредственно на окисной пленке, которая под действием электронной обработки меняет свои свойства (плотность) и в 3—4 раза увеличивает скорость растворения в травителе. В качестве электронорезиста может быть использован полимер полиметилметакрилат. При облучении электронорезиста толщиной менее 1 мкм потоком электронов с энергией 5—20 кэВ нарушаются молекулярные связи и растворимость электронорезиста в проявителе (метилизобутилкетон) резко возрастает. Таким образом, электронорезист является позитивным. В пленке полиметилметакрилата получены линии шириной 450 Å.

Высокая стоимость оборудования и недостаточно высокая производительность обработки ограничивают использование электронолитографии в основном производ-

стве. Эффективнее эти процессы при изготовлении фотошаблонов. На каком этапе производства фотошаблонов следует применять электронолитографию — зависит от практически достигнутой точности. Известно, например, что электронно-лучевое экспонирование было успешно применено для изготовления фотооригинала в масштабе 10 : 1 с точностью $\pm 0{,}004$ мм. С совершенствованием процесса (повышением разрешающей способности) станет возможным изготовление фотошаблонов сразу в натуральном масштабе.

Весьма перспективными являются исследования в области рентгеновской литографии, которая отличается от электронно-лучевой литографии меньшей стоимостью процесса и простотой оборудования. Для экспонирования используют мягкие рентгеновские лучи, которые получаются при бомбардировке электронами молибденовой, алюминиевой или медной мишеней. Соответствующие длины волн рентгеновских лучей равны 5,4; 8,3 и 13,3 Å. На позитивном резисте полиметилметакрилате получены линии шириной 0,2 мкм.

Для облегчения операции визуального совмещения и возможности непосредственного совмещения рисунков (а не знаков) представляют интерес полупрозрачные фотошаблоны. Рисунок полупрозрачного фотошаблона выполняют из материала, хорошо поглощающего ультрафиолетовый свет. Удовлетворительными характеристиками поглощения обладают следующие окислы и системы на их основе: Fe_2O_3, V_2O_5, NiO, $Fe_2O_3 — V_2O_5$ и $Fe_2O_3 — NiO$. Нанесение окислов на стекло можно осуществить катодным распылением (в частности реактивным). Наилучшие результаты с точки зрения возможности травления и сопротивления истиранию получены на системе, состоящей из 10 мол. % Fe_2O_3 и 90 мол. % V_2O_5.

Повышение точности совмещения перед экспонированием на кремниевых пластинах достигается за счет автоматизации и исключения таким образом субъективных ошибок человеческого глаза. Для этого установки совмещения и экспонирования снабжают фотоэлектрическими микроскопами, обеспечивающими точность совмещения $\pm 0{,}1$ мкм по линейным координатам и $\pm 5''$ по углу.

Один из возможных принципов автоматического совмещения показан на рис. 1.43. Знак совмещения на

пластине имеет вид креста, а на шаблоне — двойного креста. При удовлетворительном совмещении рисунков пластины и шаблона крест пластины должен находиться в центре двойных лучей креста на шаблоне. Для получения информации о взаимном расположении знаков между фотоэлементом и фотошаблоном попеременно в направлении X и Y перемещаются диафрагмы в виде узких щелей, параллельных лучам крестов. В результате по каждому направлению создается серия из трех импульсов, расстояния между которыми во времени несут информацию о взаимном расположении знаков совмещения на пластине и фотошаблоне. Импульсы поступают на формирующее устройство, а затем на логическое устройство, выдающее после их анализа сигналы на исполнительный механизм перемещения пластины.

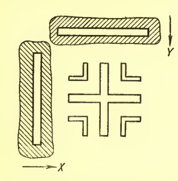


Рис. 1.43. Расположение знаков совмещения при автоматическом совмещении пластины с шаблоном

§ 1.7. Конструктивно-технологические модификации полупроводниковых микросхем

Выпускается и разрабатывается большое число типов полупроводниковых микросхем (главным образом интегральных), отличающихся конструкцией (структурой) и технологическими приемами изготовления. Во всех этих разработках основное внимание уделяется решению главных задач микроэлектроники: повышению надежности и быстродействия микросхем и снижению их стоимости. Поэтому ведется поиск новых конструктивно-технологических решений, которые позволили бы: 1) добиться максимальной и надежной межэлементной изоляции; 2) повысить степень интеграции и сократить количество паяных и сварных соединений; 3) сократить число технологических операций (особенно высокотемпературной обработки и совмещения) и повысить выход годных микросхем.

Далее рассмотрены типичные модификации полупроводниковых микросхем и технологические особенности их изготовления.

Эпитаксиально-планарная структура n^+-p-n^+ со скрытым слоем. Структура ИС, изображенная на рис. 1.44, позволяет сократить число операций диффузии и совмещения. В исходную кремниевую пластину p-типа осуществляют избирательную диффузию n^+-примеси для получения скрытого слоя. Затем на поверхность пластины методом эпитаксии наносят слой кремния p-типа. Далее проводят избирательную диффузию n^+-примеси сквозь эпитаксиальный слой, в результате чего получают электрическое соединение скрытого слоя с поверхностью и одновременно изолируют отдельные элементы друг от друга, так как диффузия n^+-примеси проводится по всему периметру каждого элемента. В образовавшемся изолированном островке кремния p-типа, играющем роль базы, путем избирательной диффузии формируют n^+-эмиттер. Далее следует обычная технология получения межсоединений (на рис. не показаны).

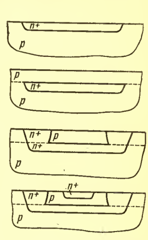


Рис. 1.44. Основные этапы формирования эпитаксиально-планарной структуры типа n^+-p-n^+

Рассмотренная технология позволяет получить низкоомный коллектор, что повышает быстродействие транзистора, и исключить одну операцию диффузии и одну операцию совмещения по сравнению с известной технологией, представленной на рис. 1.5. Кроме того, площадь транзистора уменьшается на 40—50% по сравнению с обычной эпитаксиально-планарной структурой. Недостаток рассмотренной структуры — пониженное пробивное напряжение и повышенная удельная емкость коллекторного перехода.

Монолитные ИС с контактными выступами. Наиболее распространенный монтаж монолитных полупроводниковых ИС состоит в использовании проволочных проводников для электрического соединения кристалла с

внешними выводами корпуса (рис. 1.45, *а*). С помощью термокомпрессии один конец проводника присоединяют к контактной площадке кристалла, другой — к соответствующему выводу корпуса. Количество сварных соединений равно удвоенному числу контактных площадок кристалла.

Идея контактных выступов заключается в создании на поверхности контактных площадок кристалла массивных проводящих выступов, способных надежно припаиваться непосредственно к плоским выводам корпуса *. Контактные выступы получают на этапе групповой обработки одновременно для всех кристаллов кремние-

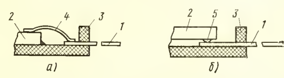


Рис. 1.45. Электрическое соединение кристалла ИС с внешними выводами корпуса:

а — с помощью проволочных перемычек, *б* — с помощью контактных выступов; *1* — плоский вывод корпуса; *2* — кристалл ИС; *3* — корпус; *4* — проволочная перемычка; *5* — контактный выступ

вой пластины. При монтаже в корпусе кристалл в перевернутом виде укладывают контактными выступами на выводы корпуса, нагревают и припаивают за счет оплавления припоя, нанесенного на выступы (рис. 1.45, *б*).

На рис. 1.46 показана последовательность групповой обработки поверхности кристалла при изготовлении контактных выступов. После образования межсоединений по ранее приведенной технологии на поверхность пластины наносят путем осаждения изоляционную пленку (например, SiO_2) толщиной 0,3 мкм. С помощью фотолитографии в пленке вскрывают круглые окна диаметром 0,07 мм, расположенные над внешними алюминиевыми контактами кристаллов. Методом напыления в вакууме последовательно наносят слой ванадия и слой меди толщиной 0,1 и 0,3 мкм соответственно. Ванадий выполняет роль переходного слоя от алюминия к меди, обеспечивая надежный омический контакт. После маскирования фоторезистом, в результате которого открытыми оста-

* Гусаровас М., Кобецкий Ю. Создание и исследование свойств контактных выступов. Сб. «Физическая электроника», т. 1. Каунас, 1972.

ются лишь медные круглые площадки, выполняют гальваническое наращивание меди (35 мкм), а затем серебра (1,5 мкм). Далее следует снятие фоторезиста и избирательное травление пленок меди и ванадия. Контактные выступы при этом защищены слоем серебра. Процесс заканчивается лужением полученных выступов припоем (например, ПСрОС 3—58) толщиной порядка 10 мкм. Защитной маской при этом является изоляционный слой, нанесенный в начале процесса.

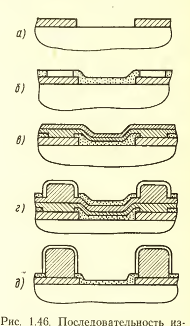


Рис. 1.46. Последовательность изготовления контактных выступов:
а — участок групповой пластины с межсоединениями; *б* — осаждение диэлектрика, фотолитография по диэлектрику; *в* — напыление ванадия и меди; *г* — маскирование фоторезистом, гальваническое наращивание меди и серебра; *д* — снятие фоторезиста, избирательное травление меди и ванадия, облуживание припоем (слои ванадия и меди условно не показаны)

Температура плавления припоя должна быть выше температуры, при которой осуществляется герметизация микросхем (во избежание повторного расплавления припоя). Опыт зарубежных фирм показывает возможность использования системы «индий — медь», где индий играет роль временного припоя. При температуре 155° С он плавится, смачивая медную поверхность выступов и выводов корпуса. После проверки схемы кристалл в случае надобности может быть удален повторным нагревом. В процессе герметизации, когда температура достигает 400° С, индий диффундирует в медь, образуя сплав с температурой плавления около 700° С.

Контактные выступы позволяют сократить число внешних соединений вдвое по сравнению с проволочными выводами и за счет этого повысить надежность микросхемы, а также существенно снизить трудоемкость монтажно-сборочных работ.

Балочные ИС. В интегральных схемах с балочными выводами внешние выводы кристалла изготавливают по групповой технологии с последующим их соединением непосредственно с выводами корпуса. В этом смысле они обладают теми же преимуществами, что и ИС с контактными выступами. Дополнительным преимуществом ИС с балочными выводами является возможность разделения элементов и создание надежной изоляции в виде воздушных промежутков (которые могут быть и запол-

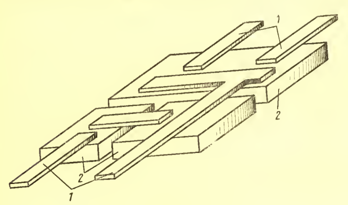


Рис. 1.47. ИС с балочными выводами:
1 — балочные выводы; *2* — элементы ИС

нены изоляционным материалом). Необходимая конструктивная прочность микросхемы обеспечивается достаточно толстыми проводниками межсоединений, которые и связывают отдельные элементы воедино (рис. 1.47).

При проектировании топологического рисунка межсоединений вместо обычных контактных площадок предусматривают удлиненные полоски (0,5—1 мм) шириной 0,1—0,2 мм — будущие балочные выводы. Вначале кристаллы групповой пластины обрабатывают по технологии монолитных интегральных схем. Во время металлизации кроме вакуумного напыления подслоя применяют электролитическое наращивание золота (10—30 мкм), после чего производят избирательное травление. Далее материал подложки удаляют шлифованием, а элементы разделяют сквозным избирательным травлением кремния. Таким образом, во время формирования элементов можно исключить два высокотемпературных

процесса — эпитаксиальное наращивание и разделительную (изолирующую) диффузию.

ИС с балочными выводами по сравнению с ИС с контактными выступами имеют ряд недостатков:

1) необходимость введения в процесс трудоемкой механической обработки;

2) потери площади кремниевой пластины из-за увеличения промежутков между элементами и проводниками (для компенсации растравливания при глубоком травлении кремния и металлической пленки), а также потеря площади под консольной частью балочных выводов;

3) зависимость механической прочности ИС от толщины проводников.

Потери площади кристалла между элементами из-за растравливания могут быть уменьшены, если использовать *анизотропное травление* специальными травителями. Если рабочая поверхность пластины ориентирована в кристаллографической плоскости {100}, то скорость травления в направлении $<100>$ в 20—30 раз превышает скорость травления в направлении $<111>$. В результате травления получают V-образные канавки, стенки которых образуют угол 54° с кристаллографической плоскостью {111}. Исходная ширина канавки (на поверхности пластины) увеличивается незначительно.

Многокристальные микросхемы. Многокристальные микросхемы получают путем монтажа на изоляционной подложке (ситалл, керамика) отдельных бескорпусных полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов), а также групп элементов, выполненных в одном кристалле (диодные и резисторные матрицы), или отдельных простейших монолитных микросхем. Межсоединения осуществляют с помощью проволочных проводников через тонкопленочные проводники и контакты, напыленные на подложку, или непосредственно между кристаллами. Последний способ уменьшает количество соединений. Общий вид многокристальной микросхемы (без герметизации) представлен на рис. 1.48.

Применение многокристальных микросхем целесообразно в мелкосерийном и опытном производстве (опытно-конструкторские разработки, макетирование и т. п.), так как их освоение не требует заметных единовременных затрат и основано на использовании унифицирован-

ных элементов массового выпуска. Препятствием для серийного и массового выпуска подобных схем является невысокая надежность (большое количество соединений) и высокая трудоемкость монтажных работ. Оба эти показателя могут быть улучшены при использовании элементов с контактными выступами, которые монтируются в перевернутом виде на контактных площадках общей подложки.

Монолитные ИС на МДП-приборах. Большое развитие (особенно в цифровой технике) получили ИС на основе приборов со структурой металл — диэлектрик — полупроводник (МДП). МДП-прибор (рис. 1.49) представляет собой униполярный (симметричный) триод, состоящий из областей истока и стока, а также управляющего электрода-затвора, с помощью которого можно изменять проводимость участка полупроводника, лежащего между истоком и стоком. В отличие от биполярных транзисторов в МПД-приборах, работающих в режиме переключения, не происходит накопления заряда, так как в проводящем канале ток обусловлен основными носителями. В основном используют приборы с индуцированным каналом, работающие по принципу обогащения канала *n*-или *p*-типа носителями (т. е. нормально закрытые приборы). МДП-прибор может выполнять роль резистора, если на затвор подано только постоянное напряжение смещения. Величина этого напряжения определяет электропроводность канала, т. е. сопротивление МДП-резистора. В § 1.1 отмечалось, что МДП-конденсаторы технологически совместимы со структурой МДП-транзистора.

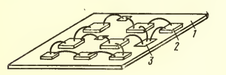


Рис. 1.48. Многокристальная полупроводниковая микросхема:
1 — изоляционная подложка (ситалл, керамика); *2* — элемент; *3* — контактная пленочная площадка

Как следует из рис. 1.49, *а*, МДП-прибор содержит две одинаковые диффузионные области (истока и стока), которые получают за одну операцию. Затвор отделен от канала тонким слоем диэлектрика. В микросхемах на МДП-приборах с одинаковым типом электропроводности канала не требуется взаимная изоляция элементов,

так как между ними находится кремний с низкой проводимостью, а p-n-переходы всегда смещены в обратном направлении. Простота структуры схем на МДП-приборах обусловливает снижение трудоемкости их изготовления по сравнению со схемами на биполярных приборах примерно на 40%.

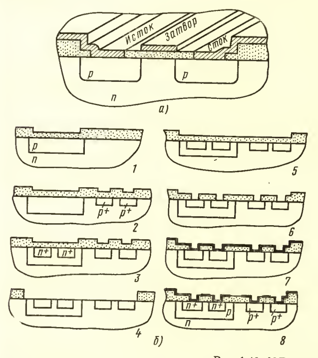


Рис. 1.49. МДП-прибор:

а — структура МДП-прибора; *б* — последовательность изготовления МДП-структуры на дополняющих приборах: *1* — формирование диффузионного p-кармана, *2* — формирование диффузионного истока и стока p^+-типа, *3* — формирование диффузионного истока и стока n^+-типа, *4* — снятие окисла, *5* — окисление, *6* — вытравливание окон под контакты, *7* — металлизация, *8* — травление металла и образование межсоединений

Наибольший интерес, однако, представляют микросхемы на дополняющих МДП-приборах, т. е. приборах с различными типами электропроводности каналов. Такие микросхемы обладают повышенным быстродействием. В этом случае возникает проблема изоляции приборов с p-каналами от приборов с n-каналами. При этом возможны два метода:

1) создание изолирующих областей (карманов) для приборов с каналом одного типа электропроводности;

2) раздельное выполнение двух типов приборов на двух пластинах кремния с последующим соединением их с помощью контактных выступов (бикристальные или полуинтегральные микросхемы).

Недостатком второго метода является трудность точного совмещения кристаллов при сборке, которая возрастает с функциональным усложнением схемы (увеличение количества выводов).

Первый метод может быть реализован с помощью диффузии или эпитаксии. Применение эпитаксии для образования изолирующих карманов характеризуется повышенной трудоемкостью, так как связано с глубоким избирательным травлением кремния, эпитаксиальным наращиванием на рельефную поверхность и последующей механической и химической полировкой поверхности.

Наиболее технологичный метод изоляции — использование диффузии для формирования карманов. Целесообразно изолирующие карманы выполнять для приборов с *n*-каналом. Это облегчает получение высоколегированных *n*-областей истока и стока и их омического контакта с алюминием.

Последовательность обработки ИС на дополняющих МДП-приборах представлена на рис. 1.49, *б*. Исходной заготовкой является пластина кремния *n*-типа ($\rho = 5$ Ом·см, $N = 10^{15}$ см$^{-3}$). Диффузионные карманы *p*-типа выполняют глубиной 10—15 мкм; они имеют $\rho = 0{,}5$ Ом·см и $N = 10^{17}$ см$^{-3}$. Последняя характеристика является оптимальной. Она обеспечивает малое изменение свойств поверхности вследствие обеднения бором при окислении и достаточно большое пробивное напряжение исток — сток. Глубина областей истока и стока (*n*- и *p*-типа) 3—4 мкм. Толщина окисла под затвором 0,2 мкм. Чтобы защитный слой окисла исключил образование паразитных каналов электропроводности под проводниками микросхемы, его толщина должна составлять не менее 1,5 мкм.

Наибольшая трудность возникает во время фотолитографии при совмещении затвора с областью канала. Перекрытие затвором областей истока и стока приводит к увеличению паразитной емкости. Наличие продольного зазора между затвором и областями истока и стока яв-

ляется причиной образования неуправляемых областей канала с большим последовательным сопротивлением. Наилучшее совмещение получается при использовании ионного легирования областей истока и стока, когда затвор выполняет роль маски (см. рис. 1.22).

Другая технологическая трудность — получение тонкой пленки диэлектрика под затвором. Диэлектрическая пленка должна быть электрически прочной, так как электрические поля, возникающие в ней, близки к критическим ($E=10^6$ В/см). Поэтому инородные включения и нарушения стехиометрии пленки должны быть минимальны. Кроме того, заряд в пленке должен быть минимальным и стабильным по времени. Дрейф электрических параметров пленки приводит с течением времени к изменению поверхностной проводимости в канале. Положительные результаты дает использование системы SiO_2—S_3N_4. Пленка нитрида кремния, расположенная над пленкой двуокиси кремния, содержит большое количество ловушек, чем предохраняет пленку двуокиси от проникновения в нее ионов из внешней среды.

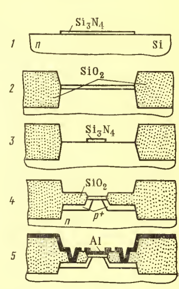


Рис. 1.50. Основные этапы изготовления МДП-транзистора методом локального окисления:

1 — маскирование нитридом кремния с подслоем SiO_2 (на рисунке не показан); *2* — локальное окисление кремния; *3* — избирательное травление Si_3N_4 и подслоя SiO_2; *4* — диффузия примеси для образования областей истока и стока и последующее окисление этих областей; *5* — образование окон под контакты, формирование затвора и межсоединений

Достаточно малые паразитные емкости в системе Al—Si_3N_4—SiO_2—Si можно получить с помощью метода локального окисления кремния (рис. 1.50). На кремниевой пластине создается двухслойная маска SiO_2—Si_3N_4. Незащищенные места подвергают термическому окислению на глубину около 1 мкм, в результате чего создается слой окисла около

2 мкм. Далее производится избирательное травление Si_3N_4 и тонкого слоя SiO_2 с целью создания диэлектрика под будущий затвор. Через образованные окна осуществляется диффузия для получения областей истока и стока, которые далее термически окисляются на глубину около 0,5 мкм. Затем следует обычная технология (вскрытие окон под контакты, металлизация и получение межсоединений).

В данной структуре перекрытие затвором областей истока и стока имеет место на участках с достаточно толстым окислом, что не приводит к образованию заметных паразитных емкостей. Перекрытие в районе тонкого окисла мало и вызвано боковой диффузией примеси.

Одним из эффективных методов повышения быстродействия МДП-приборов является метод кремниевого затвора. По сравнению с алюминиевым кремниевый затвор позволяет повысить быстродействие прибора примерно вдвое. Достигается это за счет снижения порогового напряжения (вследствие меньшей работы выхода кремния по сравнению с алюминием) и уменьшения паразитных емкостей благодаря высокой степени совмещения затвора с каналом.

Основные этапы изготовления МДП-транзистора с кремниевым затвором показаны на рис. 1.51. После выращивания тонкого окисла производится осаждение поликристаллического кремния, сильно легированного бором (для получения омического контакта с алюминием при последующей металлизации). Осаждение кремния можно осуществить с использованием SiH_4 и B_2H_6 в потоке водорода при температуре 800° С.

Далее за один этап фотолитографии формируется кремниевый затвор и вытравливаются окна под диффузию областей истока и стока. В отличие от алюминиевого кремниевый затвор допускает высокие температуры диффузии и поэтому используется в этом процессе в качестве маски. В результате перекрытие канала затвором незначительно и определяется лишь боковой диффузией.

После осаждения пассивной пленки SiO_2 и фотолитографии выполняется металлизация и формирование межсоединений. Наличие пассивной пленки поверх кремниевого затвора позволяет осуществлять пересечения с алюминиевыми проводниками без дополнительных операций.

Кремниевый затвор в отличие от алюминиевого имеет еще одно технологическое преимущество — при замене

диффузии ионным легированием отжиг пластин можно производить при достаточно высоких температурах и, следовательно, более эффективно.

Большое внимание уделяется приборам с зарядовой связью (ПЗС), предложенным впервые в 1970 г. Бойлом и Смитом. По существу ПЗС являются многозатворными МДП-приборами, принцип работы которых основан на хранении заряда неосновных носителей в потенциальных

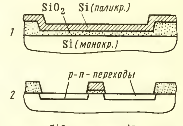


Рис. 1.51. Основные этапы изготовления МДП-транзистора с кремниевым затвором:
1 — получение локальных участков тонкого окисла и осаждение кремния; 2 — формирование кремниевого затвора и диффузия примеси; 3 — окисление, вскрытие окон под контакты, формирование межсоединений

ямах, образующихся у поверхности полупроводника под действием внешнего электрического поля, и на перемещении этого заряда вдоль поверхности при сдвиге потенциальных ям.

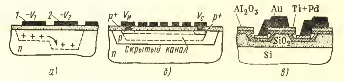


Рис. 1.52. Приборы с зарядовой связью:
а — простейшая структура ПЗС; б — структура со скрытым каналом; $V_и$ и $V_с$ — напряжение истока и стока соответственно; в — ПЗС с «подрезанной изоляцией»

В простейшем случае ПЗС представляет собой монокристаллический полупроводник *n*-типа, покрытый толстым слоем окисла, в котором локально созданы участки тонкого (1000—1200 Å) окисла. На этих участках сформированы металлические затворы (рис. 1.52, *а*).

Если к затвору *1* приложить отрицательное напряжение $-V_1$, то у поверхности полупроводника образуется

обедненная область, которая является потенциальной ямой для неосновных носителей. Поэтому заряд дырок, инжектируемый каким-либо образом в потенциальную яму, может храниться в ПЗС. Наличие или отсутствие заряда характеризует два логических состояния ПЗС.

Если на затвор *2* подано напряжение $|V_2|>|V_1|$, то в области полупроводника между затворами *1* и *2* образуется электрическое поле. Вследствие дрейфа и диффузии дырки будут перемещаться в более глубокую потенциальную яму под затвором *2*. При отсутствии заряда под затвором *1* заряд под затвором *2* также будет отсутствовать. Таким образом, информация переписывается из одного прибора в другой.

На ПЗС могут быть построены сдвиговые регистры, логические элементы, ЗУ и другие устройства вычислительной техники.

Для эффективной работы ПЗС необходимо ослабить влияние двух факторов, которые приводят к потере заряда при его перемещении вдоль поверхности кристалла: поверхностные состояния на границе полупроводник — диэлектрик и потенциальные барьеры, имеющие место в межэлектродной области полупроводника. Для существенного ослабления первого фактора необходимо, чтобы плотность поверхностных состояний не превышала 10^{-8}—10^{9} $см^{-2}$. Для уменьшения потенциальных барьеров расстояния между электродами должны составлять не более 2 мкм.

В связи с этим реальные структуры ПЗС более сложные, чем это представлено на рис. 1.52, *а*.

Роль поверхностных состояний существенно уменьшается, если перемещение заряда осуществлять не по поверхности полупроводника, а на некоторой глубине. На рис. 1.52, *б* показана структура ПЗС со скрытым каналом. При приложении к *p-n*-переходу обратного смещения потенциальный минимум для электронов оказывается не у поверхности, а на некотором расстоянии от нее. Если на электрод подать положительный относительно подложки потенциал, то потенциальная яма может быть заполнена электронами.

На рис. 1.52, *в* изображена система затворов, в которой достигается эффект нулевого зазора между затворами (ПЗС с «подрезанной изоляцией»). Используя слой Al_2O_3 в качестве маски, выполняют локальное травле-

ние слоя SiO_2, в результате чего в пленке SiO_2 получаются углубления с подтравливанием под маску. Благодаря ступенчатой структуре каждого затвора достигается «самосовмещение» соседних затворов. Такая конструкция требует высококачественной и хорошо отработанной технологии, в особенности литографических процессов.

В настоящее время нет оптимальных в конструктивно-технологическом отношении структур ПЗС. Очевидно, что технология ПЗС будет базироваться на достижениях в производстве ИС на МДП и биполярных приборах.

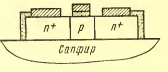


Рис. 1.53. МДП-прибор с *n*-каналом на сапфировой подложке

Гетероэпитаксиальные ИС. В гетероэпитаксиальных ИС использована возможность выращивания монокристаллических кремниевых пленок на изоляционной подложке, кристаллографические параметры которой близки к параметрам кремния. Последующее избирательное удаление пленки кремния с подложки (кроме перемычек, несущих межсоединения) позволяет достичь надежной изоляции отдельных элементов.

В эпитаксиальной пленке может быть сформирована обычная эпитаксиально-планарная структура ИС. Однако более целесообразно формирование областей с вертикальными *p-n*-переходами за счет сквозной диффузии через эпитаксиальный слой. Такую структуру (рис. 1.53) используют для ИС на основе МДП-приборов. Площадь *p-n*-переходов, зависящая от толщины пленки и ширины областей, может быть сведена к минимуму и контролироваться очень точно. Кроме того, пассивная подложка не может действовать как паразитный затвор. Данная технология дает возможность формировать дополняющие МДП-приборы на основе пленки одного типа электропроводности.

Проводятся исследования по выращиванию эпитаксиальных слоев кремния на сапфире и магний-алюминиевой шпинели. Синтетический сапфир представляет собой монокристаллическую окись алюминия α-Al_2O_3 или корунд. Магний-алюминиевая шпинель является твердым раствором MgO и Al_2O_3 в молярном отношении 3:1.

Для сапфира выбирают такие кристаллографические

плоскости, параметры которых близки к параметрам кремния; обычно это пленки кремния {111} и {100} на гранях сапфира {0001} и {1102} соответственно. Шпинель имеет кубическую структуру и допускает более простое кристаллографическое сопряжение с кремнием, но обладает пониженной механической прочностью.

В процессе эпитаксиального наращивания используют реакции пиролитического разложения силана, диборана, фосфина, арсина (AsH_3). При осаждении пленки n-типа наблюдается автодиффузия алюминия из подложки в пленку из-за восстановления алюминия водородом. Для ослабления этого эффекта следует на начальном этапе осаждения (до полного закрытия поверхности) уменьшать температуру процесса или увеличивать скорость осаждения (до 2—10 мкм/мин). Осажденная пленка находится в напряженном состоянии, так как TKl кремния около $7{,}6\cdot10^{-6}$ град$^{-1}$, а сапфира около $6\cdot10^{-6}$ град$^{-1}$.

К поверхности подложки предъявляются очень высокие требования. На ней не должно быть следов механической обработки, так как кремниевые слои зарождаются прежде всего на царапинах и рисках. Заключительным этапом подготовки поверхности должно быть химическое травление. Сапфир плохо травится в различных травителях. Удовлетворительные результаты дает травление в расплавленной буре ($Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$) при $t=1000°$ С. Наиболее совершенные поверхности получают в результате травления в водороде при $t=1500°$ С (скорость травления 0,1 мкм/мин).

Большие интегральные схемы. Большие интегральные схемы (БИС) представляют собой микросхемы с высокой степенью интеграции (500 и более элементов в одном кристалле). В состав БИС может входить до 20—30 простейших логических схем (ячеек), объединенных с помощью межсоединений в сложную схему. Переход от схем с низкой степенью интеграции к БИС позволяет решить следующие задачи:

1) повысить быстродействие за счет уменьшения задержки сигнала на соединениях внутри кристалла;

2) увеличить надежность за счет дальнейшего сокращения числа паяных и сварных соединений;

3) улучшить воспроизводимость параметров элементов в результате применения интегральной технологии к сложным схемам;

4) добиться идентичных условий работы простейших функциональных схем (напряжение питания, температурный режим);

5) упростить проблему оптимизации параметров схемы.

Вместе с тем широкое внедрение БИС зависит от успешного решения ряда схемотехнических, конструкторских и технологических задач. К первым двум относятся вопросы помехоустойчивости в условиях многослойных межсоединений, мощности питания БИС и подвода больших токов по микропроводникам, отвода тепла и т. д.

Основная технологическая задача — добиться приемлемого выхода годных БИС при высокой степени интеграции. Если для простейших интегральных схем выход годных принять за 0,5, то объединение, например, 5 таких схем в одном кристалле уменьшит вероятность выхода годных БИС до 0,03 (т. е. 3%). Положение усугубляется необходимостью применения многослойной коммутации, что повышает вероятность брака. Поэтому совершенствование технологии монолитных ИС является необходимым условием успешного производства БИС.

При существующей технологии наиболее целесообразно проектирование БИС с избыточностью ячеек. Степень избыточности зависит от реального выхода годных ячеек. Топология межсоединений в этом случае определяется расположением годных ячеек на пластине (метод избирательного монтажа). На общей пластине изготавливают матрицу ячеек по обычной технологии монолитных ИС. Первая металлизация служит для соединения элементов в отдельных ячейках и предусматривает создание контактных площадок для контроля правильности функционирования каждой ячейки в отдельности. При контроле ячеек информацию о местоположении годных и дефектных ячеек вводят в ЭВМ. Туда же вводят данные о функциональных характеристиках БИС и основные правила проектирования рисунка межсоединений 2-го и 3-го уровней. Межсоединения 2-го и 3-го уровней выполняют в обход дефектных ячеек, т. е. рисунок межсоединений каждой БИС оказывается в общем случае индивидуальным.

В случае относительно невысокого уровня интеграции БИС возможен другой подход — для БИС устанавливают определенную конфигурацию, состоящую из определенного числа примыкающих друг к другу ячеек. Для

этой конфигурации разрабатывают и изготавливают необходимый комплект фотошаблонов. После контроля ячеек на функционирование и составления карты расположения годных ячеек (рис. 1.54, *а*) на групповой пластине «выкраивают» участки с годными ячейками, соответствующие выбранной конфигурации (рис. 1. 54, *б*).

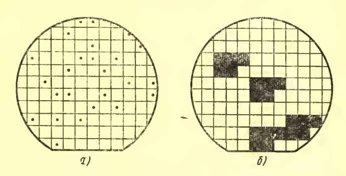


Рис. 1.54. Метод выделения БИС типовой конфигурации:
а — расположение годных ячеек на пластине (точками отмечены дефектные ячейки); *б* — размещение БИС типовой конфигурации на пластине (БИС состоит из 5 ячеек).

Полученные участки последовательно экспонируют с помощью соответствующего фотошаблона. Степень интеграции (количество ячеек) и конфигурацию БИС определяют после предварительного анализа выхода годных ячеек и характера их распределения на пластинах.

Глава вторая

ТЕХНОЛОГИЯ ГИБРИДНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСХЕМ

§ 2.1. Физические основы термического вакуумного напыления

Требования к процессу нанесения тонких пленок. Элементы тонкопленочных микросхем формируют на основе проводящих, резистивных, полупроводниковых и диэлектрических пленок, толщина которых обычно находится в пределах 100—10 000 Å.

Степень влияния толщины пленки на точность основного параметра для резисторов и конденсаторов определяется выражениями относительных погрешностей сопротивления и емкости:

$$\delta_R = \delta_\rho + \delta_d + \delta_a + \delta_l; \qquad (2.1)$$

$$\delta_C = \delta_\varepsilon + \delta_d + \delta_a + \delta_l, \qquad (2.2)$$

где δ_ρ — относительная погрешность объемного удельного сопротивления резистивной пленки; δ_ε — относительная погрешность диэлектрической проницаемости диэлектрической пленки; δ_d — относительная погрешность толщины пленки; δ_a и δ_l — относительные погрешности размеров элемента в плане (рис. 2.1).

Если предположить, что все четыре фактора имеют равное влияние на основной параметр, то для резистора с точностью по сопротивлению $\pm 10\%$ допустимое отклонение толщины должно равняться $\pm 2{,}5\%$, что при толщине пленки порядка сотен ангстремов составляет несколько атомных слоев.

Точность электрофизических параметров ρ и ε определяется чистотой исходных резистивных и диэлектри-

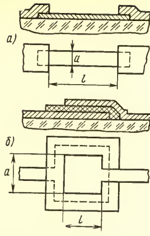


Рис. 2.1. Пассивные элементы пленочных микросхем:
а — резнстор; *б* — конденсатор

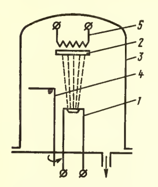


Рис. 2.2. Схема подколпачного устройства установки вакуумного напыления:
1 — испаритель; *2* — подложка; *3* — колпак; *4* — заслонка; *5* — нагреватель подложки

ческих материалов, наличием посторонних загрязнений в процессе напыления, а также воспроизводимостью структуры пленки, зависящей от стабильности технологических режимов.

Геометрия элементов в плане (размеры a и l) обеспечивается применением масок и слабо зависит от физической природы процесса.

Из сказанного следует, что процесс нанесения тонких пленок должен удовлетворять следующим основным требованиям:

1) исходный материал должен наноситься на подложку диспергированным до атомарного (молекулярного) состояния;

2) содержание в рабочем пространстве посторонних веществ, способных реагировать с наносимым материалом или абсорбироваться в нем, должно быть ничтожно малым;

3) процесс должен быть универсальным, т. е. допускать нанесение различных материалов (от проводящих до диэлектрических) единым по физической сущности методом.

Этим требованиям в достаточной мере удовлетворяет процесс термического вакуумного напыления.

На рис. 2.2 приведена упрощенная схема подколпачного устройства для нанесения тонкой пленки на подложку путем испарения материала в вакууме. В усло-

виях вакуума материал, помещенный в испаритель *1*, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке *2*, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри колпака *3*, связанного с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Таким образом, для осуществления процесса необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

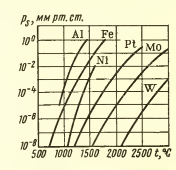


Рис. 2.3. Зависимость давления насыщенного пара некоторых металлов от температуры

Испарение вещества. Энергия выхода молекулы при нагреве вещества должна быть достаточной для преодоления межмолекулярных связей. В первую очередь поверхность материала покидают наиболее «нагретые» молекулы, т. е. молекулы, обладающие наибольшей энергией. Поэтому испарение имеет место при любой температуре, хотя испарение вещества с понижением температуры значительно уменьшается. Одновременно с испарением происходит и обратный процесс: некоторые молекулы в результате столкновения с другими молекулами пара возвращаются обратно в вещество (конденсируются). При равенстве количества испаряющихся и конденсирующихся в единицу времени молекул наступает термодинамическое равновесие (состояние насыщения). Равновесная плотность пара данного вещества, а следовательно, и его давление p_s зависят только от температуры: с возрастанием температуры давление пара быстро возрастает (рис. 2.3). Связь давления насыщенного пара p_s с абсолютной температурой T выражается следующей эмпирической зависимостью

$$\lg p_s = A - B/T, \qquad (2.3)$$

где A и B — постоянные, характеризующие вещество (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Температуры плавления и испарения некоторых элементов

Элемент	Атомный вес	$t_{пл}$, °C	Условная $t_{исп}$, °C	Коэффициенты *		Рекомендуемые материалы испарителя
				A	*B*	
Ag	107,9	961	1047	(9,28) 8,66	(14 850) 14 090	Ta, Mo, W, Al_2O_3
Al	27	660	1150	8,99	15 630	W, Ta, Mo, Nb
Au	197	1063	1465	8,65	18 520	W, Mo
Bi	209	271	698	8,98	10 660	Ta, W, Al_2O_3
C	12	3700	2681	(11,06)	(38 570)	**
Cd	112,4	321	264	(8,78	(5 800)	W, Ta, Al_2O_3
Co	58,9	1490	1650	9,43)	21 960	Nb
Cr	52	1800	1205	(9,88)	(17 560)	W, Nb, Mo, Ta
Cu	63,5	1083	1273	8,72	16 580	W, Al_2O_3, Nb, Mo, Ta
Fe	55,8	1535	1447	(9,63) 10,41	(20 000) 21 960	W
Ge	72,6	959	1251	8,0	15 150	Ta, Mo
Mg	24,3	651	443	(8,82)	(7 740)	W, Ta, Mo
Mn	54,9	1244	980	(9,25)	(14 100)	W, Ta, Mo
Mo	95,9	2622	2533	(8,8)	(30 310)	**
Ni	58,7	1455	1510	(10,28) 9,55	(21 840) 20 600	W, BeO, Al_2O_3
Pd	106,4	1555	1566	8,46	19 230	W
Pt	195	1774	2090	9,63	27 500	W
Sb	121,8	630	678	8,42	9 910	Ta, W, Al_2O_3
Si	28	1415	1342	(10,20)	(19 700)	BeO
Ta	181	2996	3070	10,0	40 210	**
Ti	47,9	1725	1546	(8,25) 8,98	(18 640) 20 110	W, Ta
W	183,9	3382	3309	(9,24)	(40 260)	**
Zn	65,4	419	343	(8,94)	(6 740)	W, Mo, Ta, Al_2O_3

* Значения в скобках для твердого состояния.
** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Температуру вещества, при которой давление насыщенного пара $p_s = 10^{-2}$ мм рт. ст., называют условной температурой испарения $T_{усл}$. Как видно из табл. 2.1, для некоторых веществ условная температура испарения ниже температуры плавления, т. е. эти вещества достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния (возгонка или сублимация).

Скорость испарения, т. е. количество вещества (в граммах), покидающее 1 см² свободной поверхности ве-

щества в 1 с,

$$w = C\,\frac{p_s - p}{p_0}, \qquad (2.4)$$

где p — давление пара над поверхностью вещества; p_s — давление насыщенного пара; p_0 — давление окружающего газа; C — постоянная, характеризующая род вещества.

Из выражения (2.4) следует, что процесс вакуумного напыления пленок возможен при $p_s > p$, т. е. при неравновесном состоянии пара. Если потребление пара из области, окружающей вещество, отсутствует, то давление p быстро достигнет значения насыщения p_s. Такое состояние может иметь место в случае достаточно нагретой поверхности камеры, в результате чего пар не будет конденсироваться, а также в случае большой плотности газа, окружающего вещество, вследствие чего молекулы пара не диффундируют в окружающее пространство. На последнее указывает в формуле величина p_0: чем выше давление окружающего газа, тем ниже скорость рассасывания (диффузии молекул вещества), а следовательно, и скорость испарения.

Тормозящее действие на диффузию паров в окружающее пространство может оказывать сам пар при высоком давлении насыщения (высокой температуре испарения).

Достаточно благоприятные условия для диффузии (испарения материала) возникают при давлениях насыщенного пара p_s не более 1 мм рт. ст. и давлении окружающего газа p_0 не более 10^{-3} мм рт. ст., когда пар имеет возможность свободно и равномерно распределиться по объему замкнутого пространства.

В этом случае скорость испарения

$$w = 0{,}05833 \cdot p_s \cdot \sqrt{M/T} \ \ [\text{г/см}^2 \cdot \text{с}], \qquad (2.5)$$

где M — молекулярный вес, г/моль; T — абсолютная температура, К.

При условной температуре испарения $T_{\text{усл}}$

$$w \approx 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{M/T_{\text{усл}}}. \qquad (2.5')$$

В табл. 2.1 приведены характеристики некоторых применяемых в микросхемах материалов.

Следует иметь в виду, что формула (2.5) выведена при условии равновесного состояния газа, когда скорость испарения со свободной поверхности вещества равна скорости конденсации на эту же поверхность. В реаль-

ных условиях относительно холодные стенки вакуумной камеры, детали арматуры и сама подложка конденсируют на своей поверхности пары, снижая истинное давление паров и приводя к увеличению скорости испарения, т. е. к нарушению равновесия.

Учет сложных условий конденсации затруднителен, поэтому формулы (2.5) и (2,5′) могут служить лишь для приближенной оценки скорости испарения материала, а также для качественного сравнения степени испарения различных материалов.

С технологической точки зрения важнее знать скорость конденсации паров на подложке, чем скорость испарения материала на испарителе.

Формирование молекулярного потока. Для получения приемлемых скоростей роста пленки, а также для экономного расходования материала (нередко дорогостоящего), необходимо создать условия движения молекул вещества преимущественно по направлению к подложке.

Направленное движение молекул вещества к подложке, т. е. молекулярный пучок, может быть создано, во-первых, за счет достаточно глубокого вакуума и исключения таким образом столкновений молекул вещества с молекулами остаточного газа, во-вторых, путем соответствующего формирования поверхности вещества, излучающего молекулы.

Для определения условий существования молекулярного пучка удобнее характеризовать степень вакуума не давлением остаточного газа p_0, а средней длиной свободного пробега молекул газа:

$$\lambda = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}\; p_0 \delta^2} \text{ [см]}, \tag{2.6}$$

где $k = 1{,}03 \cdot 10^{-19}$ мм рт. ст.$\cdot$см^3/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура газа, К; δ — эффективный диаметр молекулы газа, см.

Для воздуха ($\delta \approx 3{,}7 \cdot 10^{-8}$ см) при комнатной температуре ($T \approx 300$ К):

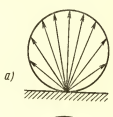
$$\lambda \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p_0}. \tag{2.6′}$$

Из выражения (2.6′) следует, что уже при давлении $p_0 = 10^{-4}$ мм рт. ст. средняя длина свободного пробега λ составляет 50 см, что превышает реальное расстояние D

(рис. 2.2) от испарителя до подложки (обычно не более 30 см).

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление порядка 10^{-4}—10^{-5} мм рт. ст.

Другая задача заключается в создании молекулярного пучка такой формы, которая обеспечила бы максимальную направленность движения молекул вещества к подложке. При этом для образования на подложке конденсата, равномерного по толщине, необходимо обеспечить одинаковую плотность падающего пучка по всей поверхности подложки.



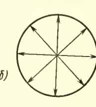


Рис. 2.4. Диаграммы направленности при излучении плоской поверхностью (*а*) и точечным источником (*б*)

По аналогии с законами геометрической оптики для молекулярных пучков сформулированы законы (законы Ламберта — Кнудсена), определяющие их структуру:

1) интенсивность излучения молекул (атомов) с поверхности испарителя пропорциональна косинусу угла между направлением излучения и нормалью к поверхности;

2) число испаренных с точечного испарителя молекул (атомов), достигающих единицы поверхности подложки в секунду, обратно пропорционально квадрату расстояния от испарителя до подложки (рис. 2.4).

Эти законы помогают рационально выбрать расстояние между испарителем и подложкой, размеры подложки и форму излучающей поверхности испарителя. В частности из них вытекают две практические рекомендации:

1) если излучающая поверхность является плоской и соизмерима по площади с подложкой, последнюю следует располагать возможно ближе к испарителю. Это обеспечивает большую плотность потока (скорость осаждения) и равномерность конденсации;

2) если подложка по площади заметно превышает излучающую поверхность, ее следует располагать возможно дальше от испарителя. При этом плотность пото-

ка (скорость конденсации) с удалением подложки падает, а равномерность конденсата возрастает.

Плоской излучающей поверхностью обладает расплав вещества в испарителях типа лодочек и тиглей (см. далее). Миниатюрная ванна расплава в твердом образце, облучаемом сфокусированным электронным лучом, небольшое отверстие-диафрагма над тигельным испарителем, поперечное сечение испарителя стержневого типа — все это в первом приближении точечные источники молекулярного потока.

Большую роль в формировании молекулярных пучков играют отражатели и диафрагмы. Отражающая поверхность, нагретая до температуры, близкой к температуре испарителя, становится вторичным испарителем, так как независимо от угла падения отражает молекулы по закону косинуса. Придание отражающей поверхности соответствующей формы позволяет увеличить интенсивность потока в полезном направлении.

Диафрагмы дают возможность «вырезать» из общего потока пучок нужного сечения и направленности и избежать бесполезного распыления вещества.

Конденсация вещества на подложке. Двигаясь от испарителя к подложке со скоростью порядка 500 м/с и обладая энергией kT, молекула вещества при столкновении с подложкой отдает ей часть своей энергии. Доля энергии, передаваемая подложке тем меньше, чем выше температура подложки. Сохранив при этом некоторый избыток энергии, молекула вещества способна перемещаться (мигрировать) по поверхности подложки (состояние адсорбции), теряя постепенно свой избыток энергии и стремясь к тепловому равновесию с подложкой.

В то же время миграция молекулы вдоль подложки происходит в потенциальном поле, рельеф которого характеризуется наличием «бугров» и «ям» и представляет собой распределение сил связи (сил Ван-дер-Ваальса) по поверхности подложки.

В процессе миграции возможны следующие результаты:

1) встретив на пути движения потенциальную «яму» (сильная связь с подложкой), молекула теряет избыток энергии и фиксируется на подложке (конденсируется), становясь центром кристаллизации;

2) встретив на пути движения потенциальный «бугор» (слабая связь с подложкой) и обладая достаточным

избытком энергии, молекула покидает подложку (вторичное испарение, реиспарение, десорбция);

3) встретив на пути движения другую мигрирующую молекулу (или группу молекул), молекула вступает с ней в сильную связь (металлическую), в результате чего подвижность группы и вероятность ее десорбции значительно падают. При достаточно крупном объединении молекул такая группа полностью теряет способность мигрировать и фиксируется на подложке, становясь центром кристаллизации.

Вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллитов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку. С этого момента подложка уже не влияет на свойства напыленной пленки. Поэтому начальная стадия напыления имеет решающее значение в формировании свойств пленки.

Повышение температуры подложки при прочих неизменных условиях увеличивает энергию адсорбированных молекул, т. е. их подвижность. В результате повышается вероятность десорбции (вторичного испарения) одиночных молекул и групп молекул на «буграх» потенциального рельефа и уменьшается вероятность конденсации одиночных молекул в потенциальных «ямах». Таким образом, устойчивыми могут быть только крупные групповые образования молекул. Количество этих образований на единицу площади с повышением температуры подложки уменьшается, так как повышается вероятность встречи мигрирующих молекул. Это означает формирование крупнокристаллической структуры пленки.

При достаточно высокой температуре подложки (называемой критической) вероятность реиспарения становится равной единице и конденсации не происходит.

Повышение плотности падающего пучка (увеличение скорости испарения) при прочих неизменных условиях повышает вероятность образования многоатомных групп и уменьшает вероятность реиспарения. Таким образом, с повышением плотности пучка критическая температура подложки возрастает. В то же время увеличение количества центров кристаллизации способствует образованию мелкокристаллической структуры (вплоть до аморфной).

Из изложенного также следует, что основными силами, связывающими пленку с диэлектрической подложкой, являются силы Ван-дер-Ваальса. Последние могут быть существенно ослаблены за счет экранирующего действия жировых пленок на поверхности подложки и адсорбированного подложкой газа. Поэтому процессу напыления должна предшествовать тщательная очистка поверхности подложки. Повышению адгезии способствует нагрев подложки в процессе напыления (десорбция газов с поверхности) и повышение скорости испарения (бомбардировка слабо связанных с подложкой молекул газа и их десорбция).

Заметное повышение адгезии наблюдается при образовании окиси на поверхности раздела пленка — подложка. Установлено, что легко окисляющиеся металлы (Al, Cr, Mn, Ti, W и др.) имеют к ситалловым и стеклянным подложкам более высокую адгезию, чем трудноокисляемые (Au, Pt, Pd). Наличие химических связей с подложкой создает своеобразный «клеевой» слой. Это явление широко используют в практике производства микросхем.

Рассмотренные явления имеют место на начальной стадии формирования пленки до образования сплошного покрытия. В дальнейшем подложка не влияет на скорость роста пленки и ее структуру. При конденсации молекул отражение практически отсутствует, подвижность резко падает и молекулы вступают в сильные взаимные связи.

Важным фактором воспроизводимости параметров пленочных элементов и улучшения их электрических свойств является чистота пленки. Загрязнения напыленной пленки происходят вследствие некачественной очистки поверхности подложки (в частности и от адсорбированных газов), недостаточно высокого вакуума (имеет значение и состав остаточного газа) и низкого давления насыщенного пара материала испарителя при температуре испарения. Повышение температуры подложки и скорости испарения способствует десорбции газа из пленки и улучшает ее состав.

В процессе напыления температуру подложки устанавливают обычно не выше 300—350° С. Ограничением для повышения температуры могут являться нагревостойкость материала подложки, заметная разность *TKl* подложки и пленки, а также низкая скорость конденсации (большой коэффициент отражения). Вследствие разно-

сти TKl напыленные пленки обладают значительными внутренними напряжениями, которые возрастают с толщиной пленки.

Для снятия внутренних напряжений целесообразно вводить дополнительный рекристаллизационный отжиг пленок в вакууме.

§ 2.2. Техника термического вакуумного напыления

К основным элементам подколпачного устройства относятся: испарители, маски, подложки, подложкодержатели и маскодержатели, нагреватели подложек, заслонки.

Испарители. К материалам испарителей предъявляются следующие требования:

1) между материалом испарителя и испаряемым веществом не должно происходить химических реакций;

2) не должны образовываться легколетучие сплавы этих веществ, так как в противном случае происходит загрязнение наносимых пленок и разрушение испарителя;

3) давление пара материала испарителя при температуре испарения напыляемого вещества должно быть пренебрежимо малым.

При термическом вакуумном напылении испаряемые материалы нагревают прямым или косвенным путем: при прямом нагреве — непосредственно пропускаемым по нему током (резистивный нагрев), индукционным способом или электронной бомбардировкой; при косвенном нагреве — теплопередачей от испарителя, причем нагрев испарителя может быть так же резистивным, индукционным или электронной бомбардировкой.

Прямой резистивный нагрев применяют для металлов, у которых температура плавления выше температуры испарения (испарение методом сублимации). К таким металлам относятся: цинк, хром, титан, марганец, магний, кадмий.

Основное преимущество указанного метода состоит в отсутствии теплового контакта испаряемого материала с элементами испарителя, что приводит к повышению чистоты напыляемой пленки. Основное ограничение — невозможность испарения диэлектриков. Кроме того, рези-

стивным прямым нагревом невозможно испарять большинство металлов.

Индукционный нагрев характеризуется высокой стоимостью оборудования (высокочастотные мощные генераторы).

Метод прямого нагрева испаряемого материала электронной бомбардировкой позволяет получить поток энергии с большой концентрацией мощности (до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²). На рис. 2.5 изображены схемы электронно-лучевых испарителей (ЭЛИ).

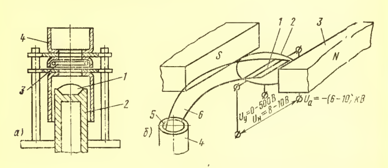


Рис. 2.5. Электронно-лучевые испарители

Под действием высоких ускоряющих напряжений электроны приобретают большую кинетическую энергию, которая при столкновении с материалом, находящимся на аноде, переходит в тепловую. Под действием тепловой энергии, выделяющейся на поверхности с площадью порядка нескольких квадратных миллиметров, материал начинает интенсивно разогреваться, плавиться и испаряться из этого небольшого объема. Тигель охлаждается водой и поэтому он и прилегающие к нему участки испаряемого материала остаются холодными. При этом достигается высокая чистота испаряемого материала.

В ЭЛИ с кольцевым лучом (рис. 2.5, *а*) нагрев объема материала *1*, помещенного в охлаждаемый водой медный тигель *2*, служащий анодом, производится хорошо сфокусированным лучом электронов, испускаемых кольцевым катодом *3*, который находится под отрицательным потенциалом (до 10 кВ) относительно заземленного анода. Фокусировка луча на поверхности материала достигается перемещением фокусирующего электрода *4*.

В ЭЛИ со сфокусированным лучом (рис. 2.5, *б*) катод находится под напряжением — $U_а$ относительно заземленного, медного, охлаждаемого водой тигля *4*, служащего анодом. Электроны, вырывающиеся с поверхности катода *1*, формируются в ленточный луч *6* с помощью щелевой диафрагмы в управляющем электроде *2*, который находится под напряжением — $U_у$ относительно катода. Затем ленточный луч попадает в магнитное поле отклоняющей магнитной системы *3*, которая может быть создана на основе как постоянного магнита, так и электромагнита. Под действием силы Лоренца, действующей на электроны, электронный луч *6* искривляется (при этом достигается дополнительная фокусировка луча) и попадает на объем материала *5*, помещенного в тигель-анод *4*.

Рис. 2.6. Испарители с косвенным резистивным нагревом:
а — в виде проволоки; *б* — в виде изогнутой проволоки; *1* — токовводы; *2* — вольфрамовая проволока ⌀ 1—2; *3* — вольфрамовая проволока ⌀ 0,2—0,3; *4* — испаряемый металл

К преимуществам метода относятся:

а) возможность испарения тугоплавких материалов (металлов, диэлектриков);

б) простота контроля и регулирования скорости напыления;

в) возможность быстрого перемещения нагретой зоны материала за счет отклонения потоков электронов.

Недостатками являются:

а) сложность аппаратуры питания испарителя;

б) сложность напыления металлов с высокой теплопроводностью (медь, алюминий, серебро, золото) из охлаждаемого тигля.

Испарители с косвенным резистивным нагревом применяют для испарения металлов и диэлектриков. В случае небольшого количества испаряемый металл используют в виде проволоки (рис. 2.6). При пропускании тока испаряемый металл расплавляется и смачивает испаритель. Тонкая вольфрамовая проволока увеличивает поверхность смачивания и тепловой контакт испаряемого материала с испарителем. Ленточный испаритель (рис. 2.7, *а*), изготовленный из тонкого листа тугоплав-

кого материала с отформованными полусферами, пригоден для испарения сыпучих материалов (металлов и диэлектриков).

Если в процессе напыления наблюдается выброс макроскопических частиц, повреждающих напыляемую пленку, применяют испарители в виде лодочки (рис. 2.7, *б*) с одним или двумя экранами, отверстия в которых смещены в шахматном порядке. Тигельный испаритель, представленный на рис. 2.7, *в*, используют для испарения больших количеств сыпучих диэлектрических материалов.

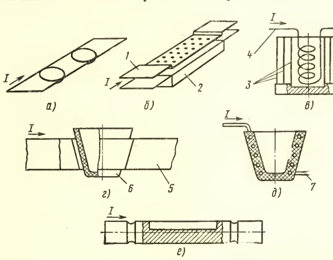


Рис. 2.7. Испарители с косвенным нагревом:
1 — экран; *2* — лодочка; *3* — тепловые экраны; *4* — проволочный подогреватель; *5* — ленточный подогреватель; *6* — тигель; *7* — проволочный подогреватель

В табл. 2.1 перечислены материалы испарителей, которые рекомендуются при испарении соответствующих металлов с учетом общих требований к материалам испарителей. Материалы испарителей в таблице расположены по степени их пригодности для испарения данного материала (элемента).

Некоторые материалы (в частности алюминий) при испарении с металлических испарителей (проволочных, ленточных, в виде лодочек) с косвенным нагревом образуют летучие сплавы, что приводит к разрушению испарителей и загрязнению пленки. В этом случае производят

испарение из тигельных испарителей, изображенных на рис. 2.7, *г*, *д*, *е*. Материал тигля подбирают таким, чтобы отсутствовали химические реакции с испаряемым материалом. Необходимо также учитывать при выборе материала тигля температуру испарения.

Максимально возможные температуры некоторых материалов тиглей

Кварц	1400° C
Окись алюминия (алунд)	1600° C
Окись бериллия	1750° C
Окись тория	2200° C
Графит	3000° C

Тигельный испаритель, показанный на рис. 2.7, *д*, при равной мощности питания нагревается до более высокой температуры, чем испаритель рис. 2.7, *г*, вследствие лучшего теплового контакта тугоплавкой спирали подогревателя с тиглем. Графитовый тигельный испаритель, приведенный на рис. 2.7, *е*, представляет собой стержень с выфрезерованным углублением в центре, куда закладывают испаряемое вещество.

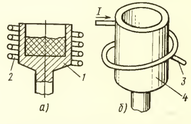


Рис. 2.8. Испарители с косвенным нагревом:
1 — тигель; *2* — индуктор; *3* — катод; *4* — тигель

Тигельные испарители с косвенным индукционным нагревом (рис. 2.8, *а*) и нагревом электронной бомбардировкой (рис. 2.8, *б*) применяют для испарения металлов и диэлектриков.

В тигельных испарителях большой емкости рис. 2.8, *а* в качестве материала тигля *1* используют тугоплавкий металл или графит, вокруг которого располагают индуктор *2*.

В тигельных испарителях рис. 2.8, *б* тигель *4*, выполненный из проводящего тугоплавкого материала, находится относительно катода *3* под высоким (2—10 кВ) положительным потенциалом. Катод *3* из вольфрамовой проволоки нагревается током накала и в условиях давлений ниже 10^{-4} мм рт. ст. эмиттирует электроны, кото-

рые нагревают тигель-анод *4* до 2500° С. Данный испаритель может испарять с высокими скоростями большое количество вещества (металлы, диэлектрики) с низкими и высокими температурами испарения.

Маски. К маскам, формирующим элементы микросхем, предъявляются следующие требования:

1) высокая точность размеров прорезей (до ±0,005 мм при ширине 0,1 мм);

2) достаточная жесткость и упругость при толщине 0,08—0,1 мм;

3) высокая чистота обработки поверхности и плоскостность (неровности не более ±0,05 мм);

4) достаточная нагревостойкость в условиях вакуума без заметных деформаций, газовыделений и испарения.

К материалам масок, удовлетворяющим перечисленным требованиям, относятся медные сплавы, сталь, молибден, бериллиевая бронза и др. Для изготовления масок используют фотохимический метод, электроэрозионную обработку, обработку электронным лучом. При выборе того или иного метода изготовления масок необходимо учитывать объем выпуска микросхем.

Технология изготовления трафаретов фотохимическим методом состоит из ряда технологических процессов: получения фотооригинала, прецизионного фотографирования, фотохимической обработки, контроля. Вследствие многооперационности и сложности применяемого оборудования этот метод экономически выгоден в условиях массового и крупносерийного производства микросхем.

Процесс изготовления фотошаблонов рассматривался в гл. 1. Схема процесса изготовления монометаллической маски представлена на рис. 2.9. Недостатком монометаллических масок является растравливание материала и как следствие этого ограниченная точность (порядка ±15 мкм).

Чтобы не допустить растравливания, применяют биметаллические маски. В качестве основы биметаллических масок применяют, как правило, бериллиевую бронзу БрБ-2 толщиной 0,1—0,15 мм; маскирующий слой — никель (10—12 мкм) наносится на основу методом электролитического осаждения.

Схема получения биметаллических масок показана на рис. 2.10. Биметаллические маски характеризуются высокой точностью изготовления рисунка и относительной простотой технологического процесса. Основным не-

достатком биметаллических трафаретов являются: непрочность нависающих слоев никеля и коробление в процессе напыления в результате разности коэффициентов линейного расширения бронзовой основы и никелевого покрытия. Частичное устранение этих недостатков достигается при использовании триметаллических масок (с

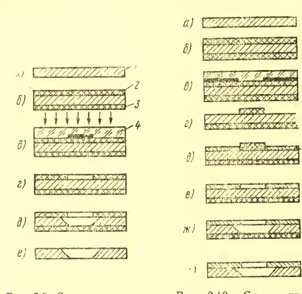


Рис. 2.9. Схема процесса изготовления монометаллической маски:

а — очистка заготовки *1*; *б* — нанесение фоторезиста *2* и защитного лака *3*; *в* — совмещение с фотошаблоном *4* и экспонирование ультрафиолетовым светом; *г* — удаление незасвеченного фоторезиста; *д* — травление; *е* — удаление фоторезиста и защитного лака

Рис. 2.10. Схема процесса изготовления биметаллической маски:

а — очистка заготовки; *б* — нанесение фоторезиста и защитного лака; *в* — совмещение и экспонирование; *г* — удаление незасвеченного фоторезиста; *д* — осаждение пленки никеля *1*; *е* — удаление фоторезиста; *ж* — селективное травление; *з* — удаление лака

двусторонним никелевым покрытием). Трудность изготовления заключается в совмещении фотошаблонов с высокой точностью (не хуже 3—5 мкм) в процессе двустороннего экспонирования.

Электроэрозионный метод эффективен для простой топологии микросхем при единичном изготовлении масок (опытное и мелкосерийное производство микросхем). Для

изготовления масок используют две разновидности электроэрозионной обработки:

1) на электроэрозионных прошивочных станках с профилированным инструментом (метод копирования);

2) на электроэрозионных станках с непрофилированным инструментом — проволокой.

В первом случае достигается высокая производительность и высокая точность для простых конфигураций прорезей. Для сложных конфигураций стоимость инструмента значительно возрастает, а точность падает. Преимуществом второго метода является простота получения замкнутого контура практически любой сложности и возможность получения прецизионных тонких щелей; недостатком является необходимость переустановки электрода-проволоки на каждый новый замкнутый контур маски.

Для изготовления масок может быть использован электронный луч, полученный в вакууме 10^{-5}—10^{-4} мм рт. ст. с помощью электронной пушки и сфокусированный до размера пятна 20 мкм.

Заготовка маски, помещенная в фокус луча, перемещается в плоскости, перпендикулярной лучу по контуру, повторяющему рисунок прорезей. Сложность процесса заключается в необходимости создания прецизионных механизмов перемещения, работающих в глубоком вакууме. При перемещении координатного стола с точностью не хуже ± 1—2 мкм точность элементов рисунка маски ± 2—3 мкм.

Подложки. Материалы подложек должны удовлетворять следующим требованиям:

а) высокое электрическое сопротивление;

б) малая диэлектрическая проницаемость;

в) механическая прочность и стабильность размеров;

г) высокая теплопроводность;

д) термостойкость до 500—600° С;

е) возможность обработки поверхности до 13—14 класса чистоты;

ж) отсутствие газовыделения в условиях вакуума и повышенной температуры;

з) химическая инертность к материалам элементов микросхем и их растворителям;

и) TKl, близкий к TKl материала пленки.

В табл. 2.2 приведены основные физико-механические характеристики материалов подложек пленочных микросхем.

Таблица 2.2

Основные физико-механические характеристики материалов подложек пленочных микросхем

Характеристика	Стекло бесщелочное		Ситалл СТ50-1	Керамика	
	С41-1	С48-3		22ХС	„Поликор"
Класс чистоты по ГОСТ 2789—59	14	14	13—14	12	14
TKl, 10^{-7} град$^{-1}$ (в интервале температур)	41±2 (20—300)	48±2 (20—300)	50±2 (20—300)	60±5 (20—200) 70±5 (20—500) 75±5 (20—900)	70—75 (20—800)
Теплопроводность, 10^{-3} кал/(см·с·град)	—	2—3,2	≥3,4	≥20	60—90
ε при 10^6 Гц и t=20° С	7,5	6,8	8,5	≤10,3	10,5
Электрическая прочность, кВ/мм	≥40	≥40	—	>50	—
tg δ при 10^6 Гц и t=20° С	20×10^{-4}	15·10^{-4}	20·10^{-4}	≤6·10^{-4}	1·10^{-4}

Высокое удельное объемное сопротивление, высокая механическая прочность, термостойкость, высокий класс чистоты поверхности — все это обеспечило широкое использование ситалла в качестве подложек тонкопленочных микросхем. Ситаллы являются продуктом кристаллизации стекол с очень мелкими (до 0,01 мкм), равномерно распределенными по объему кристаллами, соединенными тонкими прослойками остаточного (аморфного) стекла.

Очистка подложек. Степень очистки подложек определяет качество тонкопленочных элементов, воспроизводимость характеристик, адгезию. Чистые поверхности являются чрезвычайно активными и быстро покрываются находящимися в окружающей среде газами, влагой, пылью и различными поверхностно-активными веществами, тонкие слои которых крайне трудно удаляются с поверхности.

К методам контроля чистоты поверхности подложки относятся:

1) испытание на разрыв пленки воды, покрывающей поверхность подложки;

2) измерение краевого угла капли масла на подложке;

3) измерение усилия перемещения титановой иглы по поверхности подложки (метод «царапины»).

Наиболее простым методом контроля является испытание на разрыв пленки воды. Если поверхность подложки свободна от гидрофобных соединений, то высыхающая пленка воды распределяется по ней сплошным тонким слоем. Метод капли основан на измерении краевого угла θ капли масла (масло часовое С-3). Значение краевого угла зависит от соотношения когезионных сил внутри капли и адгезионных сил между подложкой и каплей.

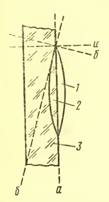


Рис. 2.11. Определение чистоты подложки методом капли: *1* — капля масла; *2* — отражение капли в подложке; *3* — подложка

На рис. 2.11 изображена капля масла под микроскопом. Подложку в вертикальном положении устанавливают под микроскоп ММИ и пунктирную линию, наблюдаемую в окуляр, совмещают с вершинами капли (*а* — *а*). Показания круговой шкалы микроскопа фиксируются. Пунктирная линия переводится в положение касательной к капле (*б* — *б*). Разница в показаниях составляет угол θ, который не должен превышать 3°. Чем меньше этот угол, тем лучше качество очистки.

Метод царапины основан на измерении усилия перемещения титановой иглы по поверхности подложки. Более чистые поверхности обладают большим коэффициентом трения, загрязнения же играют роль смазки.

В производстве микросхем принята следующая последовательность процесса очистки подложек:

а) установка подложек в кассету;

б) кипячение;

в) промывка;

г) сушка;

д) хранение в эксикаторе.

Этот процесс обеспечивает максимальную чистоту под-

ложек, а также максимальную адгезию пленки к подложке. Очищаемые подложки загружают в кассеты в вертикальном положении на определенном расстоянии друг от друга, что обеспечивает свободный доступ моющего раствора к очищаемой поверхности. Кассету с

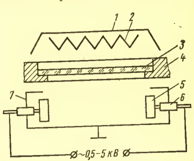


Рис. 2.12. Схема очистки подложки в тлеющем разряде:

1 — тепловой экран; 2 — радиационный подогреватель; 3 — подложка; 4 — подложкодержатель; 5 — высоковольтные электроды тлеющего разряда, 6 — изолятор, 7 — металлический экран для подавления паразитных разрядов

подложками кипятят в смеси перекиси водорода с аммиаком при pH=7,0, в результате чего удаляются в основном неорганические загрязнения. Затем подложки тщательно промывают водой (для удаления следов сме-

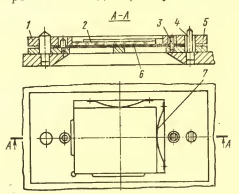


Рис. 2.13. Конструкция узла подложкодержателя и маскодержателя

си) и обрабатывают в парах органического растворителя (для удаления жировых пленок), а затем в горячем нейтральном газе.

Окончательное удаление молекул воды и адсорбированных молекул газов осуществляют непосредственно перед напылением в вакуумной установке. Вакуумный

прогрев при температуре 200—300° С в течение 2—3 мин приводит к выделению основной части молекул газов и воды. Одновременно с прогревом осуществляют очистку подложки в тлеющем разряде согласно рис. 2.12. (Механизм очистки подложки см. § 2.8.)

Подложкодержатели, маскодержатели. При напылении на многопозиционных установках процесс совмещения маски с подложкой производится механически без разгерметизации вакуумной камеры. Подложкодержатель *1* (рис. 2.13) и маскодержатель *5* совмещаются с помощью штифтов *4*. Подложка *2* прижимается торцами к базовым поверхностям подложкодержателя с помощью пружин *7*. Маска *6* укреплена на маскодержателе с помощью штифтов *3*.

Несовмещение между отдельными слоями микросхем определяется точностью выполнения диаметров штифтов и отверстий, межцентровых расстояний между штифтами и отверстиями.

§ 2.3. Пассивные тонкопленочные элементы

Резисторы. Электрофизические свойства тонких резистивных пленок существенно отличаются от свойств массивных образцов. На рис. 2.14 приведена зависимость объемного удельного сопротивления пленок, напыленных в вакууме, от их толщины. Проводимость пленки появляется с некоторого значения $d_{кр}$, когда отдельные кристаллы срастаются и пленка становится сплошной *. С увеличением толщины удельное сопротивление резко падает и затем приближается к значению ρ для массивных образцов, оставаясь однако выше его.

Приведенная зависимость может быть объяснена с помощью формулы Матиссена

$$\rho = \rho_1(T) + \rho_2, \qquad (2.7)$$

где ρ_1 — составляющая полного сопротивления, связанная с тепловыми колебаниями кристаллической решетки; ρ_2 — составляющая, обусловленная рассеянием электронов на дефектах решетки.

Для пленок с толщиной, близкой к средней величине длины свободного пробега электронов (сотни Å), сущест-

* До срастания кристаллов небольшая проводимость имеет место вследствие туннельного эффекта.

венным дефектом является граница пленки (обрыв кристаллической решетки). С возрастанием толщины преобладающими дефектами становятся границы между зернами, а также молекулы поглощенного газа. С повышением температуры подложки размер зерна увеличивается, количество поглощенного газа уменьшается и удельное сопротивление пленки падает.

По технологическим и эксплуатационным соображениям ρ целесообразно выбирать на пологом участке кривой (более высокая воспроизводимость при напылении) и при достаточно высокой температуре подложки (меньший уход сопротивления в процессе эксплуатации).

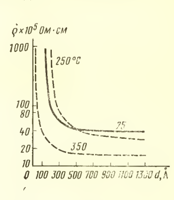


Рис. 2.14. Зависимость удельного сопротивления пленок хрома от толщины пленки и температуры подложки

В § 2.1 отмечалось, что геометрия резисторов в плане (размеры a и l) обеспечивается съемными металлическими масками в процессе напыления или фотомасками в процессе фотолитографии. Контроль за процессом напыления резистивных пленок, таким образом, сводится к обеспечению необходимого объемного сопротивления ρ и толщины пленки d. Поскольку ρ зависит от условий напыления и от толщины пленки (см. рис. 2.15), а непосредственное измерение толщины пленки в процессе напыления затруднено, целесообразно измерять комплексную величину $R_{сл}$, представляющую собой поверхностное сопротивление пленки (сопротивление квадрата пленки):

$$R_{сл}=\rho/d, \tag{2.8}$$

где ρ — объемное сопротивление пленки, Ом·см; d — толщина пленки, см.

В производстве достаточно хорошо освоены в качестве резистивных пленочных материалов хром, нихром, тантал и сплав МЛТ-3М (Fe, Cr, Si, W), для которых $R_{сл}$ выбирается в пределах 300—500 Ом. Перспективными являются металлокерамические материалы (керметы),

представляющие собой твердые растворы Cr и SiO в различных пропорциях, а также дисилициды ($TiSi_2$, $CrSi_2$, $FeSi_2$ и другие), являющиеся химическими соединениями. Дисилициды и керметы позволяют получать стабильные пленки с $R_{сл}=3000—10\,000$ Ом.

Наибольшую технологическую трудность представляет напыление сплавов. Вследствие различия упругости пара отдельных компонентов состав пленки может заметно отличаться от исходного состава. Например, сплав нихром (Ni 80%, Cr 20%), напыляемый при $t=1400°$ С, образует на подложке пленку, имеющую состав: Ni 60%, Cr 40%.

Следует также иметь в виду, что соответствующая корректировка сплава, помещаемого в испаритель, может привести к желаемому результату лишь при испарении одной порции, т. е. при единичном напылении. В производственных условиях, где широко используют многопозиционные установки и соответственно испарители большой емкости, отдельные циклы напыления будут давать различные результаты.

Для преодоления указанных трудностей может быть использован один из следующих методов: метод форсированного режима, метод раздельных испарителей и метод микродозирования.

Методом форсированного режима осуществляют напыление при достаточно высокой температуре. Благодаря высокой скорости испарения более летучий компонент не успевает диффундировать к поверхности расплава, в результате чего происходит одновременный перенос паров компонентов к подложке в соответствии с составом. Температура испарения определяется экспериментально. Для нихрома, например, искомая температура составляет 1600° С. Этот способ наиболее эффективен для простых (двухкомпонентных) сплавов.

Методом раздельных испарителей предусматривается одновременное испарение компонентов сплава из индивидуальных испарителей, имеющих в общем случае различные температуры. На пути движения к подложке пары образуют смесь определенного состава, которая осаждается на подложку. Сложность учета геометрии системы, а также коэффициентов отражения от подложки атомов различных компонентов не позволяет решить эту задачу аналитически. Поэтому подбор температур на испарителях и температуры подложки производят экспе-

риментально. При количестве компонентов свыше 2—3 метод становится слишком сложным, а подколпачное устройство — громоздким.

Метод микродозирования (рис. 2.15) заключается в том, что на ленточный испаритель дискретно подается порошок испаряемого сплава с размером частиц 100—200 мкм. Испарение микродоз происходит практически мгновенно и полностью. В результате на подложке последовательно осаждаются очень тонкие слои. В пределах каждого слоя наблюдается неоднородный состав (вследствие фракционирования сплава), однако уже в процессе напыления взаимная диффузия атомов составляющих компонентов выравнивает концентрацию каждого компонента по толщине пленки. Данный метод особенно эффективен при напылении многокомпонентных сплавов (например, МЛТ-3М). Преимуществом метода является также отсутствие загрязнений пленки материалом испарителя (малое время контакта микродозы с испарителем).

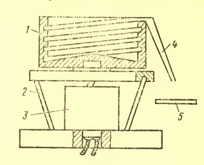


Рис. 2.15. Схема микродозирования:

1 — чаша вибробункера; *2* — пружинящие опоры; *3* — электромагнит; *4* — лоток; *5* — ленточный испаритель

Наиболее производительным и экономичным методом формирования резисторов заданной конфигурации является трафаретный метод. Технологические возможности его однако ограничены точностью изготовления узких прорезей. Для применения трафаретного метода необходимо, чтобы ширина резистора была не менее 0,2 или 0,3 мм при допусках на сопротивление $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ соответственно. При этом имеется в виду биметаллический трафарет-маска, изготовленный фотоэлектрохимическим методом.

При ширине резистора менее указанных значений используют более трудоемкий и дорогой метод фотолитографии. В этом случае на подложку наносится сплошной резистивный слой, а затем слой фоторезиста, который экспонируется через стеклянный фотошаблон. После проявления и задубливания получается защитная фотомас-

ка, позволяющая вытравить незащищенные участки резистивного слоя.

Поскольку большинство резистивных сплавов имеют высокую адгезию к ситаллу, целесообразно фотолитографию по резистивному слою выполнять после напыления через трафарет-маску проводников и контактов. При этом резистивный слой выполняет роль адгезионного подслоя для проводящих пленок.

Керметы и дисилицид $CrSi_2$ либо совсем не поддаются избирательному травлению, либо характеризуются большой неравномерностью травления. Причиной этого является образование химически устойчивой окиси хрома, образующейся одновременно с окислением кремния или моноокиси кремния и прочно сцепляющейся с подложкой.

Рис. 2.16. Схема обратной фотолитографии: *а* — технологический подслой, *б* — негативная фотомаска на технологическом подслое; *в* — избирательное травление подслоя и удаление фотомаски; *г* — напыление резистивного слоя; *д* — растворение технологического подслоя

В этом и подобных случаях может быть использован метод обратной фотолитографии, который заключается в избирательном удалении резистивного слоя за счет растворения технологического подслоя (рис. 2.16). На поверхность подложки напыляется сплошной слой легко травящегося металла (медь, алюминий и др.), который в процессе выполняет роль технологического подслоя. Далее на поверхности формируется негативная фотомаска и проводится избирательное травление подслоя. Затем поверхность покрывают сплошной резистивной пленкой и производят травление технологического подслоя. Травитель проникает через трещины и разрывы на ступеньках резистивной пленки. Таким образом, толщина технологического подслоя должна

быть достаточно большой, чтобы на ступеньках образовывались разрушения пленки, но достаточно малой, чтобы исключить заметное подтравливание подслоя (рис. 2.16, *в*). Оптимальная толщина лежит в пределах 0,2—0,3 мкм.

Процесс можно упростить, если в качестве технологического подслоя использовать фоторезист, проэкспонированный и проявленный (но без термического задубливания). На последнем этапе фоторезист растворяется в органическом растворителе.

Данный метод можно использовать для избирательного удаления широкого круга материалов (резистивных, проводящих, диэлектрических).

Растворители для металлов

Ag	г. к. H_2SO_4, HNO_3, раствор KCN, Hg
Al	к. щелочи, NH_4OH, г. кислоты
As	г. к. HNO_3. к. H_2SO_4, раствор щелочей в присутствии O_2
Au	царская водка, раствор KCN и NaOH, Hg, г. H_2SO_4
Be	рз. кислоты, г. к. HNO_3, к щелочи, г. рз. щелочи
Bi	г. к. H_2SO_4, рз. HNO_3, царская водка
Cd	HNO_3, рз. HCl, рз. H_2SO_4
Ce	рз. кислоты
Co	рз. кислоты
Cr	HCl, H_2SO_4, г. HNO_3
Cu	г. к. H_2SO_4, HNO_3, Hg
Fe	рз. кислоты
Ga	H_2SO_4, HCl, к щелочи, NH_4OH
Ge	г. к. H_2SO_4
Hg	HNO_3, царская водка
In	H_2SO_4, HCl, к. щелочи
Ir	рс. щелочи
La	кислоты
Mg	рз. кислоты
Mn	рз. кислоты
Mo	г. к. H_2SO_4, г. HNO_3, $HF+HNO_3$, царская водка
Nb	HF, рс. щелочи
Ni	рз. кислоты
Os	рс. щелочи
Pb	рз. HNO_3 к. H_2SO_4
Pd	HNO_3, царская водка, г. к. H_2SO_4, рс. щелочи
Pt	царская водка, рс. щелочи
Re	г. к. H_2SO_4, HNO_3
Rh	рс. щелочи
Ru	рс. щелочи
Sb	г. к. H_2SO_4, к. HNO_3

Sn	к. HCl, г. рз. H_2SO_4, х. рз. HNO_3, щелочи, царская водка
Ta	HF, рс. щелочи
Ti	щелочи, HF, рз. кислоты
Tl	кислоты
Th	рз. кислоты
V	HF, HNO_3, царская водка, г. к. H_2SO_4, рс. щелочи
W	царская водка, рс. щелочи, $HF+HNO_3$
Zn	рз. HCl, рз. H_2SO_4, HNO_3, к. щелочи, NH_4OH
Zr	щелочи, HF, царская водка

Примечание: к. — концентрированная; рз. — разбавленная; г.— горячая; х.— холодная; рс.— расплав.

Окончательный выбор типа травителя и его концентрации зависит от свойств нижележащего слоя, стойкости фоторезиста, толщины стравливаемого слоя и других условий.

Проводники и контакты. Основные требования, предъявляемые к материалам проводников и контактов:

1) высокая удельная электропроводность ($R_{сл} \leqslant \leqslant 0,1$ Ом);

2) высокая адгезия к ситаллу, стеклу, керамике;

3) коррозионная стойкость;

4) возможность пайки или сварки выводов.

Перечисленные требования трудно удовлетворить, используя какой-нибудь один металл. Так требованиям 1, 3 и 4 соответствуют благородные металлы (Ag, Au, Pt и др.), но они обладают плохой адгезией. Хорошая адгезия присуща металлам, имеющим высокое сродство с кислородом (Cr, Mn, Ti и др.), но они не удовлетворяют остальным требованиям.

Компромиссным решением является применение многослойных (обычно трехслойных) систем, состоящих из адгезионного подслоя, основного токонесущего слоя и антикоррозионного покрытия. В качестве адгезионного подслоя может быть использован резистивный материал (хром, нихром, МЛТ-3М), толщина которого определяется требованиями к резисторам (100—500 Å). Для токонесущего слоя целесообразно применять медь (4000—10 000 Å), а для защитного покрытия — золото (500—600 Å), серебро (800—1000 Å) или никель (800—1200 Å).

Применение многослойных систем заметно удлиняет технологический цикл. Большой экономический эффект поэтому дает двухслойная система (в качестве токонесущего слоя — медь) с последующим лужением проводни-

ков и контактов методом погружения в припой. Такая технология характерна, например, для гибридных микросхем серии К217. В данном случае на подложку напыляется сплошной слой сплава МЛТ-3М, толщина которого определяется величиной $R_{сл}$, выбранной для резисторов. Затем через металлический трафарет напыляются медные проводники и контакты. Далее методом фотолитографии формируются резисторы, после чего плата погружается в расплавленный припой (резисторы при этом не смачиваются припоем). Монтаж проволочных выводов осуществляется пайкой на облуженные контактные площадки (микропаяльником или сдвоенным электродом).

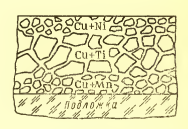


Рис. 2.17. Состав и структура пленочного проводника, полученного методом фракционирования

Большой интерес представляет попытка напыления проводников за один переход с использованием специально составленных сплавов *. В высокоэлектропроводный металл вводят различные добавки, обеспечивающие необходимые свойства проводникам на различной глубине. Последнее достигается подбором таких добавок, которые бы заметно различались упругостью паров при температуре испарения, т. е. используется свойство фракционирования сплава.

Сказанное поясним следующим примером. Пусть в медь введены добавки Mn, Ti и Ni. При температуре испарения сплава эти элементы имеют значения упругости паров, удовлетворяющие следующему неравенству:

$$p_s^{Mn} > p_s^{Ti} > p_s^{Ni}. \quad (2.9)$$

При полном испарении навески сплава на подложке осаждается слой, в котором можно выделить три области (рис. 2.17):

1) нижнюю область с преобладанием среди добавок марганца, имеющую хорошее сцепление с подложкой и

* Белоус М. В. и др. Сб. «Электронная техника», сер. VI, вып. 1, 1971.

мелкокристаллическую структуру, обеспечивающую высокую прочность;

2) среднюю с преобладанием титана, способствующего образованию крупных кристаллов и высокой проводимости;

3) верхнюю с преобладанием никеля, способствующего образованию мелкокристаллической структуры (обеспечение прочности) и коррозионной стойкости.

Метод фракционирования имеет следующие недостатки:

а) для получения воспроизводимых результатов от подложки к подложке каждое напыление необходимо вести из дозированной навески сплава с обязательным испарением навески до конца;

б) для получения резко выраженного эффекта фракционирования компоненты-добавки должны иметь достаточно большое различие в упругости пара при температуре испарения.

В ряде случаев в качестве проводников и контактов может быть использован алюминий. Это целесообразно прежде всего для схем, содержащих конденсаторы с алюминиевыми обкладками. Алюминий является наиболее подходящим материалом для обкладок, так как характеризуется малой подвижностью атомов, что уменьшает опасность короткого замыкания обкладок и пробоев конденсатора. В этом случае за один переход напыляются нижние обкладки конденсаторов и проводники с контактами. Присутствующая на поверхности пленка Al_2O_3 ухудшает электропроводность проводников и вынуждает заменять пайку выводов ультразвуковой микросваркой.

Конденсаторы. Основная технологическая задача при напылении конденсаторов — получение достаточно тонких диэлектрических пленок с минимальной пористостью.

Пористость диэлектрических пленок является их органическим недостатком, обусловленным особенностью процесса напыления — абсорбцией остаточного газа. Поэтому пробивная напряженность поля для диэлектрика, осажденного в вакууме, значительно ниже, чем у массивных образцов.

Для обеспечения необходимой электрической прочности толщину диэлектрика увеличивают по сравнению с расчетной в ущерб удельной емкости C_0 пФ/см^2. По этим же соображениям напыление верхней обкладки конден-

сатора следует вести при невысоких температурах подложки (во избежание прорастания зерен металла в глубь диэлектрика).

В производстве микросхем хорошо освоены в качестве диэлектриков следующие материалы: моноокись кремния SiO ($C_0 = 15\,000$ пФ/см^2 при $U_{раб} = 15$ В); трехсернистая сурьма Sb_2S_3 (20 000 и 4); моноокись германия GeO (15 000 и 10).

Чтобы получить большие удельные емкости, вместо методов напыления используют, например, электролитический процесс. Так, подвергнув напыленную пленку тантала (нижняя обкладка конденсатора) анодированию в электролите, можно получить достаточно тонкий и беспористый слой пятиокиси тантала Ta_2O_5, который обеспечивает $C_0 = 100\,000$ пФ/см^2 при $U_{раб} = 10$ В. Верхнюю обкладку получают вакуумным напылением.

Геометрия конденсатора в плане обеспечивается с помощью трафаретов-масок. Поэтому в процессе напыления диэлектрика необходимо непрерывно контролировать его толщину. Процесс напыления должен быть прекращен при достижении следующего расчетного значения толщины:

$$d = 885 \cdot \frac{\varepsilon}{C_0} \text{ [мкм]}, \qquad (2.10)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала; C_0 — удельная емкость, принятая при проектировании конденсатора, пФ/см^2.

В последнее время исследуются диэлектрические супермногослойные пленки, представляющие собой чередующиеся тонкие слои двух (или более) различных диэлектрических материалов.

В таких пленках на границах отдельных слоев могут образовываться энергетические барьеры для носителей заряда, увеличивающие сопротивление пленок и их электрическую прочность. Увеличение электрической прочности может быть обусловлено также тем, что при толщине отдельных слоев, соизмеримых с длиной свободного пробега электронов, вероятность неупругого столкновения электронов с узлами решетки уменьшается.

Проведенные исследования* характеристик супер-

* Ю. Д. Панков, В. А. Камин, Ю. В. Пестов. Микроэлектроника, т. 2, вып. 5, 1973.

многослойных двухкомпонентных систем показали, что они имеют преимущества по сравнению с однослойными диэлектрическими пленками на основе соответствующих материалов. Так, пленки на основе систем $SiO—B_2O_3$ (число слоев 100, общая толщина 0,63 мкм) и $SiO — MgF_2$ (число слоев 180, общая толщина 1,1 мкм) имеют характеристики в следующих пределах:

$$\rho=(0{,}4-3{,}2)\cdot10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}; \quad E_{\text{пр}}=(4-8)\cdot10^{5} \text{ В/см};$$

$$\varepsilon=5{,}6-7{,}6; \quad \operatorname{tg}\delta=(0{,}5-1{,}2)\cdot10^{-3} \text{ (на частоте 1 кГц).}$$

На основе системы $SiO — TiO_2$ (число слоев 200, общая толщина 0,36 мкм) получена пленка с повышенной диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon=12$; $\operatorname{tg}\delta=0{,}07$; $\rho=2\cdot10^{12}$ Ом·см и $E_{\text{пр}}=1{,}4\cdot10^{6}$ В/см).

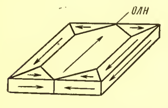


Рис. 2.18. Однодоменная структура пленки

Супермногослойные пленки изготавливают с помощью термического испарения в вакууме из двух танталовых испарителей путем поочередного перекрытия их заслонкой. Температуру подложек (стеклянных и ситалловых) выбирают в пределах 100—300° С.

Перспективными для тонкопленочных конденсаторов являются также окислы редкоземельных металлов — диспрозия, неодима, иттербия и других лантаноидов, которые при значениях $\varepsilon=10—20$ и пробивной напряженности не менее 10^6 В/см позволяют обеспечить удельные емкости до 0,1 мкФ/см².

Элементы пленочных магнитных матриц ЗУ. Если толщина образца ферромагнитного материала меньше толщины междоменной стенки (в среднем 0,1 мкм), образование в нем двух или более доменов в направлении толщины невозможно. Таким образом, достаточно тонкая ферромагнитная пленка имеет по толщине однодоменную структуру.

Размеры и форма доменов в плоскости пленки зависят от условий осаждения и толщины пленки. При наложении в процессе осаждения в плоскости подложки постоянного магнитного поля образуются крупные домены, вытянутые вдоль поля, а магнитные свойства пленки приобре-

тают одноосную анизотропию. Ось легкого намагничивания (ОЛН) совпадает при этом с направлением внешнего поля. Увеличению размеров доменов способствует также нагрев подложки. При толщине порядка нескольких сотен ангстремов магнитная пленка практически представляет собой единый домен (рис. 2.18).

Высокая степень упорядоченности доменной структуры и связанные с этим малые вихревые токи, а также малый объем материала обеспечивают небольшое время перемагничивания (десятки и даже единицы наносекунд).

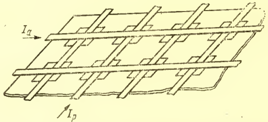


Рис. 2.19. Схематичное изображение пленочной магнитной матрицы ЗУ:
I_a — адресный ток; I_p — разрядный ток

Последнее и предопределило целесообразность использования тонких ферромагнитных пленок в качестве элементов памяти оперативных ЗУ, а также в логических схемах (например, сдвиговых регистрах), триггерах и других устройствах.

На рис. 2.19 схематически представлена конструкция пленочной магнитной матрицы ЗУ. На изоляционной (или металлической с изоляционным покрытием) подложке нанесена матрица тонкопленочных ферромагнитных элементов. Разрядные шины располагают над магнитными элементами; перпендикулярно им (через изоляционный слой) — адресные шины.

В зависимости от способа записи и считывания информации конкретная конструкция пленочной магнитной матрицы может содержать дополнительные шины записи, а адресные проводники могут представлять собой обмотки из нескольких витков. В ряде конструкций магнитный элемент (ячейка) имеет два слоя магнитного материала, между которыми заключена разрядная шина. Это позво-

ляет увеличить выходной сигнал (сигнал считывания) при одновременном уменьшении разрядного тока.

Основное требование к ферромагнитному материалу элемента сводится к обеспечению большой индукции насыщения B_s и большой коэрцитивной силы H_c.

Индукция насыщения влияет на величину считываемого сигнала и существенно зависит от состава ферромагнетика. Большая коэрцитивная сила предотвращает размагничивание элементов, возможное в результате токов записи и считывания, протекающих в соседних ячейках. Величина коэрцитивной силы зависит от состава пленки и ее толщины, а также от условий осаждения (механические напряжения, шероховатость подложки, размер зерна).

Увеличение поля анизотропии H_a снижает эффект размагничивания, но увеличивает токи считывания и записи. На величину H_a влияет состав пленки, температура отжига, механические напряжения.

Дополнительными требованиями, предъявляемыми к матрицам магнитных элементов, являются малая дисперсия анизотропии α, характеризующая рассеивание вектора H_a по величине и углу, и магнитострикция λ, которая должна быть близка к нулю.

Дисперсия анизотропии зависит от однородности свойств и толщины магнитной пленки по площади матрицы. Эффект магнитострикции в значительной мере ослабляется в случае мелкокристаллической структуры пленки.

Дефекты и напряжения в пленке приводят в процессе эксплуатации к ее старению, т. е. к переориентации первоначальной оси анизотропии. Для стабилизации свойств пленки необходимо вводить отжиг в постоянном магнитном поле.

Для изготовления магнитных элементов матриц ЗУ широко используют пермаллой, состоящий из Ni — 81,5%, Fe — 18,5%. Добавка кобальта к пермаллою увеличивает B_s, H_c и H_a и снижает чувствительность свойств материала к изменениям состава или технологических режимов. Находит применение также сплав 77Н3К, содержащий 3% кобальта.

В качестве подложки магнитных матриц применяют стекло, соответствующее ТУ 25-11-560—70, или алюминиевый сплав АМцП (ГОСТ 12592—67). Применение металлической подложки предпочтительнее, так как при

этом достигается лучшее согласование TKl, отвод тепла и экранирование от внешних полей. Отклонение от плоскостности для стеклянной подложки не более 0,2 мм, для алюминиевой — 0,05 мм. Шероховатость поверхности алюминиевой подложки должна быть ∇ 14, для чего подложки подвергают полировке.

При использовании стеклянных подложек целесообразно предварительное осаждение сплошной алюминиевой пленки, которая выполняет те же функции, что и металлическая подложка магнитных матриц. Напыление алюминия осуществляется с помощью электроннолучевого испарителя при температуре подложки 170—220° С.

В качестве изоляционного подслоя обычно применяют моноокись кремния толщиной порядка 1 мкм. Рекомендуемые температуры подложки: 300° С — для алюминиевой, 180° С — для стеклянной. Применение моноокиси кремния накладывает ограничения на процесс последующего отжига магнитной пленки: при длительном и высокотемпературном воздействии моноокись кремния вступает в реакцию с магнитной пленкой.

Наиболее ответственным этапом изготовления магнитных матриц является напыление магнитного слоя. При этом должны быть обеспечены заданный состав и химическая чистота осаждаемой пленки, получена определенная зернистость и создана резко выраженная анизотропия.

Расплавленные железо, никель и кобальт активно реагируют с танталом и молибденом. Поэтому испарение магнитного сплава следует производить либо из алундовых тиглей (нагрев электронным лучом или индукционный), либо из штабика магнитного сплава с помощью электронно-лучевого нагрева.

Для исключения влияния фракционирования сплава при испарении и обеспечения заданного состава пленки состав исходного сплава должен быть соответственно скорректирован. Например, при испарении пермаллоя из алундового тигля электронным лучом (напряжение 1600 В, ток 0,3 А) навеска материала должна состоять на $^3/_4$ из сплава 81% Ni и 19% Fe (525±25 мг) и на $^1/_4$ из сплава 85% Ni и 15% Fe (175±5 мг).

Скорость испарения должна быть достаточно большой (до 1000 Å/мин), чтобы обеспечить мелкозернистую структуру, а температура подложки должна быть умеренной (200—300° С).

Одноосная анизотропия в магнитной пленке достигается путем наложения постоянного магнитного поля в плоскости подложки в процессе напыления магнитной пленки, ее отжига и всех последующих операций обработки магнитной матрицы, связанных с нагревом подложки. Схема расположения подложки относительно магнитной системы представлена на рис. 2.20. Напряженность внешнего магнитного поля составляет 300—400 Э. Основное требование к магнитной системе — обеспечение высокой однородности поля в пределах подложки.

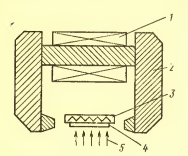


Рис. 2.20. Схема расположения подложки относительно магнитной системы:
1 — катушка электромагнита; *2* — магнитопровод; *3* — нагреватель подложки; *4* — подложка; *5* — поток пара напыляемого сплава

Одноосную анизотропию в пленке можно получить и в отсутствие внешнего магнитного поля, если атомный поток направить под углом к поверхности подложки. В этом случае ось легкого намагничивания формируется как проекция направления движения атома на плоскость подложки. Для практического использования этого метода необходим параллельный пучок атомов большого сечения, что представляет сложную техническую задачу. В то же время указанное явление объясняет одну из причин дисперсии анизотропии магнитной пленки. Для ослабления влияния угла осаждения атомов на свойства магнитных пленок и уменьшения дисперсии анизотропии размеры подложки следует ограничивать, а расстояние испаритель — подложка увеличивать. Применяют подложки со стороной не более 70 мм. Увеличение емкости магнитных матриц возможно, следовательно, за счет уменьшения размеров элементов и повышения плотности размещения ячеек.

Кроме термовакуумного осаждения магнитных пленок возможно применение катодного распыления, которое, как известно, обеспечивает однородность пленки по толщине и составу на большой площади. Вследствие соударений атомов металла с молекулами и ионами газов пары металлов рассеиваются и зависимость свойств плен-

ки от угла осаждения становится слабо выраженной. Ограниченное применение катодного распыления обусловлено ухудшением магнитных свойств пленки вследствие высокой плотности газовых включений.

Заданную конфигурацию магнитных элементов можно получить путем напыления через накладные маски-трафареты или путем напыления сплошной пленки с последующей фотолитографией. В последнем случае используют позитивный фоторезист ФП-383, а в качестве травителя — раствор хлорного железа в дистиллированной воде (удельный вес 1,39).

В большинстве конструкций пленочных матриц ЗУ разрядные шины получают вакуумным напылением. Медь марки М1 напыляется на подложку при температуре 100—200° С в присутствии магнитного поля. При напылении термовакуумным методом медь загружается в молибденовый стакан и производится электронно-лучевой нагрев при напряжении 1200 В и токе электронного пучка 0,26 А. При ионно-плазменном напылении (мишень из меди М1) применяют следующие режимы: ток накала катода до 150 А, ток разряда до 6 А, напряжение на мишени до 6 кВ, ток на мишени не более 300 мА.

При фотолитографии по меди для формирования разрядных шин используют фоторезист ФП-383 и травитель для меди следующего состава: хромовый ангидрид — 450 г; серная кислота с удельным весом 1,84—160 мл; дистиллированная вода — 450 мл. Отжиг магнитных элементов осуществляют после завершения всех операций напыления в магнитном поле при температуре 275±±25° С в течение не менее 2 ч. Охлаждение (до 80° С) также осуществляют в магнитном поле. Поверх многослойной системы, полученной в вакуумной камере, тем или иным способом монтируют адресные проводники. Один из рекомендуемых вариантов заключается в том, что на поверхность медной фольги марки М1 наносят электроизоляционный лак МЛ-92, а затем клей БФ-4 (общая толщина изоляционного слоя должна быть 10—13 мкм). Затем клей наносят на матрицу (толщина клеевого слоя 1—2 мкм) и матрицу склеивают с фольгой на прессе при $t=120$—125° С и давлении 20—30 кГ/см². Далее избирательным травлением формируют адресные проводники.

Другой вариант заключается в предварительном изготовлении системы проводников на гибкой изоляцион-

ной основе (например, на лавсане толщиной 20 мкм) и последующей сборке ее с матрицей.

Идея использования тонких магнитных пленок в качестве элементов ОЗУ была выдвинута Блуа еще в 1955 г. Тем не менее пленочные магнитные матрицы не смогли вытеснить ЗУ на кольцевых ферритовых сердечниках, хотя последние отличаются высокой трудоемкостью сборки.

Недостатками ЗУ на пленочных магнитных матрицах являются малые сигналы считывания и большие токи управления, а также технологические трудности получения матриц большой емкости. Даже при небольшой емкости матриц (1200—1800 бит) процент выхода годных матриц оказывается невысоким из-за низкой однородности ячеек. При уменьшении размеров ячеек (повышение плотности записи) возрастают трудности выделения сигнала на фоне помех.

Некоторые специалисты считают более перспективными полупроводниковые интегральные ЗУ на биполярных транзисторах и на приборах с зарядовой связью.

Рассмотренная в гл. 1 технология монолитных ИС позволяет в интегральном исполнении и в едином кристалле получить не только информационное поле (поле запоминающих элементов), но и усилители-формирователи записи и считывания, адресные схемы, устройства синхронизации и т. д. (так называемое «электронное обрамление» ЗУ).

Производство таких ЗУ станет возможным в результате развития и совершенствования технологии монолитных БИС.

§ 2.4. Методы контроля тонкопленочных элементов в процессе напыления

Особенности контроля характеристик тонкопленочных элементов в процессе напыления определяются малыми толщинами пленок от сотен до нескольких тысяч ангстрем в диапазоне скоростей напыления от десятых долей до нескольких сотен Å/с. Возможность контроля свойств тонкопленочных элементов при вакуумном методе их изготовления позволяет устранить операции подгонки после процесса напыления.

Методы контроля целесообразно разделить на две группы: методы контроля электрических характеристик

напыляемых элементов и методы контроля основных физических характеристик, которые аналитически связаны с электрическими характеристиками напыляемых пленок.

Методы контроля с помощью резистивного и емкостного датчиков позволяют контролировать непосредственно сопротивление и емкость напыляемых элементов и по достижении номинальной величины прекращать процесс напыления.

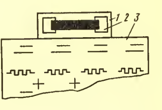


Рис. 2.21. Схема резистивного датчика:
1 — контрольная подложка («свидетель»); *2* — контакты; *3* — рабочая подложка

Методы контроля физических характеристик (кварцевый, ионизационный, гравиметрический, интерференционный датчики) предполагают нахождение аналитической или экспериментальной связи между контролируемой величиной (массой пленки, скоростью испарения, толщиной пленки) и электрическими характеристиками напыляемых элементов.

Резистивный датчик с измерителем сопротивления (метод «свидетеля») применяют при контроле сопротивления напыляемых резисторов.

Специальную контрольную подложку с предварительно напыленными контактами устанавливают в подложкодержатель рядом с рабочей подложкой (рис. 2.21). Напыление резистивной пленки на контрольную подложку осуществляют одновременно с напылением на рабочую подложку. Сопротивление «свидетеля» $R_{св}$ регистрируется с помощью пружинных контактов на внешнем приборе (рис. 2.22). При достижении определенной величины сопротивления «свидетеля» $R_{св}$ цепь обратной связи обеспечивает прекращение процесса напыления (закрывается заслонка). Перестройку системы на заданное $R_{св}$ производят переменным резистором R_3.

Расчетное значение сопротивления «свидетеля» $R_{св}$, при котором достигается заданное поверхностное сопротивление $R_{сл}$,

$$R_{св} = R_{сл} k_{ф.св} (1 + \alpha \Delta t), \qquad (2.11)$$

где $k_{ф.св}=l_{св}/a_{св}$ — коэффициент формы «свидетеля»; α — температурный коэффициент сопротивления, град$^{-1}$; Δt — разность между температурами подложки и комнатной.

Прибор КС-2 измеряет и фиксирует величину сопротивления в диапазоне до 1000 кОм с погрешностями $\pm 0{,}5\%$ (до 1 МОм — $\pm 5\%$). Измеряют также время напыления (с погрешностью $\pm 5\%$).

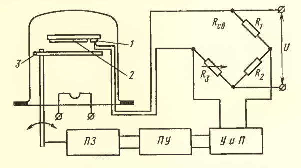


Рис. 2.22. Функциональная схема контроля методом «свидетеля»:

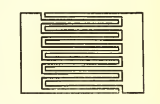
1 — «свидетель»; 2 — рабочая подложка; 3 — заслонка; ПЗ — привод заслонки; ПУ — пороговое устройство; У и П — усилитель и преобразователь

Поскольку характеристики пленок на подложке и «свидетеле» принимаются одинаковыми, можно отградуировать внешний прибор в единицах $R_{сл}$ (при постоянных $k_{ф.св}$ и температуре подложки) и вести контроль этой величины. Погрешность $R_{сл}$ при контроле данным методом составляет примерно $\pm 10\%$ и определяется неравномерностью толщины конденсата по поверхности (т. е. отличаем $R_{сл}$ «свидетеля» и рабочей подложки), невоспроизводимостью α, а также погрешностями измерения.

Для измерения характеристик диэлектрических пленок используют метод емкостного датчика. Он основан на непосредственном измерении относительного изменения электрической емкости планарного конденсатора (рис. 2.23), предварительно сформированного на контрольной подложке.

В качестве проводящих обкладок конденсатора используют алюминиевые пленки, полученные методом фотолитографии в виде узких полосок, разделенных зазо-

рами (гребенчатая структура). При этом средняя исходная емкость конденсатора, сформированного на ситалловой подложке, составляет 65 пФ. Изменение емкости системы при напылении моноокиси кремния толщиной 2 мкм достигает примерно 13%. Изменение емкости происходит за счет увеличения диэлектрической проницаемости зазоров между полосками.


Рис. 2.23. Гребенчатый конденсатор для емкостного датчика

Этот метод контроля особенно удобен при подгонке емкости планарного конденсатора путем напыления в зазоры диэлектрической пленки. При контроле трехслойного конденсатора знание аналитической связи между емкостью планарного конденсатора с нанесенной в область зазора диэлектрической пленкой и емкостью трехслойного конденсатора с такой же толщиной диэлектрической пленки дает возможность осуществить градуировку внешнего регистрирующего прибора в единицах удельной емкости. Основная погрешность данного метода заключается в погрешностях измерений малых изменений емкостей порядка 0,1—10 пФ.

Метод кварцевого датчика основан на измерении отклонений резонансной частоты кварцевого кристаллического резонатора, работающего в определенном колебательном режиме, которые обусловлены изменением массы кварцевой пластины. На протяжении многих лет этот эффект используют при изготовлении кварцевых генераторов; кроме того, широко распространена методика подгонки требуемой резонансной частоты кристалла путем напыления пленки определенной толщины.

Изменение частоты кварцевого резонатора

$$\Delta f = -C_f \frac{m}{A} \text{ [Гц]}, \qquad (2.12)$$

где C_f — массовая чувствительность, Гц·см²/г; m — полная масса материала (г), нанесенная на площадь кристалла А, см².

Пластина кварцевого резонатора (рис. 2.24) в водоохлаждаемом кварцедержателе устанавливается рядом с подложкой. Частота измерительного кварцевого генератора по мере напыления пленки уменьшается, а на

выходе первого смесителя CM_1 формируется первая промежуточная частота $f_{пч}'$, увеличивающаяся по мере увеличения массы пленки. Во втором смесителе CM_2 частота $f_{пч}'$ смешивается с частотой F генератора регулируемой частоты. При достижении равенства $f_{пч}'=F$ на выходе второго смесителя формируются нулевые биения, вследствие чего на выходе импульсно-аналогового частотомера постоянное напряжение становится равным ну-

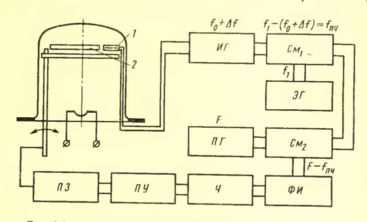


Рис. 2.24. Функциональная схема метода кварцевого датчика:
1 — кварцевая пластина в охлаждаемом кварцедержателе, *2* — рабочая подложка; *ИГ* — измерительный генератор; *См*₁, *См*₂ — смесители; *ЭГ* — эталонный генератор; *ПГ* — перестраиваемый генератор; *ФИ* — формирователь импульсов; *Ч* — частотомер; *ПУ* — пороговое устройство; *ПЗ* — привод заслонки

лю, срабатывает устройство привода заслонки, прекращая процесс напыления. Таким образом, изменяя частоту, можно задавать различную массу напыляемой пленки.

Измерение толщины диэлектрических, полупроводниковых и проводящих пленок возможно при знании их удельной плотности. Поскольку эту величину определить трудно, строят экспериментальные графики зависимости толщины пленки от смещения частоты Δf измерительного кварцевого генератора для различных материалов. Благодаря высокой точности измерений и простоте данный метод получил широкое распространение, особенно при напылении диэлектрических пленок. В табл. 2.3 указаны основные характеристики приборов, в которых использован метод кварцевого датчика.

Таблица 2.3

Основные характеристики приборов, в которых использован метод кварцевого датчика

Марка прибора	Рабочая частота, кГц	Чувствительность по серебру, Гц/Å	Максимальный сдвиг частоты датчика, кГц	Погрешность измерения частотомера, %	Погрешность измерения скорости сдвига частоты, %
КИТ-1	3 300	2,5	50	±3	—
КИТ-2	10 000	22,6	600	±2,5	—
МЭК-1	6 200	9	100	±3,0	±8,0

Существенным недостатком данного метода является то, что помимо градуировки по напыляемому материалу необходима периодическая чистка кварцевых датчиков от напыленной пленки. Максимальная суммарная толщина пленки, напыляемая на кварцевый датчик, определяется максимальным сдвигом частоты, указанным в таблице. При превышении данной величины чувствительность прибора падает.

Рис. 2.25. Схема ионизационного датчика в вакуумной камере:
1 — испаритель; *2* — подложка; *3* — экран; *4* — коллектор; *5* — сетка; *6* — катод; *7* — вращающаяся заслонка

Контроль с помощью ионизационного датчика основан на принципе работы ионизационного манометра, рассмотренного в § 2.6. Собственно датчик представляет собой ионизационную манометрическую лампу в металлическом экране (без стеклянного баллона), расположенную рядом с напыляемой подложкой. В этом случае ионный ток в датчике является функцией как давления остаточного газа p_0, так и парциального давления испаряемого материала p. Поскольку молекулы испаряемого материала распространяются прямолинейно, а молекулы остаточного газа — хаотично, то, расположив перед входом датчика вращающийся диск с отверстиями, можно модулировать во времени ионный ток в дат-

чике, вызванный ионизацией паров (рис. 2.25). Импульсный ионный ток в дальнейшем отфильтровывается с помощью электронной схемы от постоянного ионного тока, вызванного p_0. Так как p пропорционально в данный момент времени числу молекул, заключенных в единице объема в непосредственной близости от ионизационного датчика, т. е. скорости осаждения, то и ионный ток пропорционален скорости осаждения.

Для определения величины, пропорциональной толщине пленки, необходимо интегрировать скорость осаждения в пределах времени испарения. Ввиду трудности аналитического определения связи между p, непосредственно измеряемым прибором, и физическими, а также электрическими характеристиками напыляемых пленок строят экспериментальные (градуировочные) графики зависимостей скоростей напыления от величины ионного тока испаряемого материала и интегральных зависимостей этих величин. Кроме того, необходимо отметить быстрое загрязнение рабочего объема датчика парами испаряемого материала.

Основные характеристики измерителя скорости осаждения и толщины ИСТИ-1

Диапазон измеряемых скоростей осаждения (при напылении висмута)	10—200 Å/с
Максимальная относительная погрешность измерения скорости осаждения	не более ±10%
Диапазон измеряемых толщин (при напылении висмута) . .	1000—10 000 Å
Максимальная относительная погрешность измерения толщины	не более ±8%
Суммарная толщина пленки, напыляемая без смены датчика	не более 100 мкм

В *гравиметрических датчиках* использованы принципы микровесов в условиях вакуумного напыления: изгиб тонкой ленты, один из концов которой неподвижно закреплен, а на свободный конец помещено взвешиваемое тело (напыляемая пленка); растяжение тонких кварцевых или вольфрамовых цилиндрических спиралей (пружинные весы). Эти методы измерения массы пленки чувствительны (предельная чувствительность 0,1—1 мг), но вследствие малой предельной нагруз-

ки (200—1000 мг) и трудности очистки от напыленной пленки не распространены в производстве тонкопленочных микросхем.

Метод контроля с помощью интерференционного датчика наиболее удобен при изготовлении оптических пленочных покрытий. Однако этим методом можно измерять и толщины диэлектрических пленок, используя интерференционные эффекты, возникающие в системе пленка — подложка. Если показатель преломления у наносимого материала ниже, чем у подложки, то при монохроматическом освещении системы подложка — пленка наблюдается явление, состоящее в том, что по мере утолщения пленки интенсивность отраженного света уменьшается и достигает минимума в тот момент, когда оптическая толщина пленки становится равной одной четверти длины волны падающего света. Это явление обусловлено интерференционным гашением света, отраженного от свободной границы пленки и от поверхности раздела пленка — подложка. При дальнейшем утолщении покрытия отражение вновь усиливается, достигая максимума, когда оптическая толщина пленки становится равной $\lambda/2$. Измеряя число минимумов или максимумов и зная коэффициенты преломления подложки и пленки, можно определить толщину пленки по формуле

$$d = \frac{m\lambda}{4n} \text{ [мкм]}, \qquad (2.13)$$

где m — число минимумов отраженного света; λ — длина волны монохроматического света; n — показатель преломления пленки.

Применение данного метода ограничено трудностями эксплуатации оптических систем в вакуумной камере. Микроинтерферометры, в которых используется этот принцип, применяют в основном для эпизодического контроля пленок: отладка процесса, тарировка измерителей толщины и скорости напыления и в других случаях.

§ 2.5. Активные тонкопленочные элементы

В пленочной микроэлектронике (как и в полупроводниковой) существует тенденция создания пленочных интегральных схем, т. е. таких схем, в которых и пассивные и активные элементы формируются в едином технологическом процессе (термическое вакуумное напы-

ление, ионно-плазменное напыление и т. п.). По сравнению с гибридными пленочными схемами пленочные ИС не должны содержать навесных элементов и сварных внутрисхемных соединений и поэтому они должны обладать повышенной надежностью и меньшей трудоемкостью при изготовлении. Таким образом, возникает проблема создания пленочных активных элементов (ПАЭ).

В широко применяемых полупроводниковых дискретных диодах и транзисторах используют неосновные носители заряда в легированных монокристаллических материалах (кремний, германий). Своеобразие проблемы ПАЭ заключается в том, что пленочные элементы должны формироваться на поликристаллических или аморфных подложках (ситалл, керамика, стекло), оказывающих дезориентирующее влияние на структуру осаждаемых пленок (см. § 2.1). Осажденная поликристаллическая пленка полупроводника обладает столь большой плотностью дефектов, что использование неосновных носителей заряда для создания активных элементов невозможно из-за ничтожно малого времени жизни носителей.

Имеющиеся способы получения монокристаллических пленок путем напыления в вакууме (напыление на монокристаллические подложки, напыление на аморфные подложки с помощью системы неподвижной и подвижной масок и некоторые другие) не являются эффективными в серийном производстве либо из-за высокой стоимости подложек, либо из-за низкой производительности процесса. Кроме того, возникают трудности, связанные с необходимостью сильного нагрева подложек в процессе осаждения (для получения высокой подвижности атомов на поверхности подложки), а также сложность введения строго дозированного количества примесей из-за явлений фракционирования и сегрегации.

Таким образом, основные усилия по разработке ПАЭ направлены на возможность применения различных механизмов переноса носителей заряда в тонких поликристаллических пленках. В зависимости от преобладания того или иного механизма в ПАЭ могут быть использованы токи за счет надбарьерной эмиссии, токи за счет туннельного прохождения электронов, токи, ограниченные пространственным зарядом, и другие эффекты. Для ослабления явления тепловой генерации носителей в качестве материала пленки выбирают обычно полупровод-

никовые соединения типа $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$, имеющие большую ширину запрещенной зоны, а также некоторые диэлектрики.

Пленочные диоды. Применительно к пленочным диодам разработчик должен решить две задачи:

1) получение вольт-амперной характеристики большой крутизны (малое падение напряжения в прямом направлении);

2) выбор материалов электродов с резко различной работой выхода электронов в материал пленки (высокое падение напряжения в обратном направлении, высокий коэффициент выпрямления).

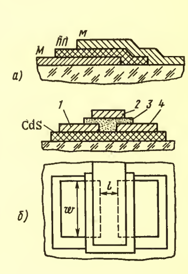


Рис. 2.26. Пленочные активные элементы

В зависимости от материала пленки и ее толщины преобладает тот или иной механизм проводимости.

Технологически задача в общем случае заключается в достижении воспроизводимых результатов по толщине, структуре и составу полупроводниковой пленки, так как эти показатели существенно влияют на воспроизводимость характеристик пленочных диодов.

Для иллюстрации характерных технологических трудностей, возникающих при изготовлении пленочных диодов, рассмотрим два типа диодов — аналоговый и туннельный.

А н а л о г о в ы й д и о д представляет собой трехслойную пленочную структуру металл — полупроводник — металл (рис. 2.26, *а*), в которой используются токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ). Диоды на основе инжекционных ТОПЗ называют аналоговыми в связи с аналогией по физическим явлениям с вакуумными диодами.

Идеальный диэлектрик * подобен вакуумному промежутку, так как вследствие широкой запрещенной зоны в нем нет свободных носителей заряда. Проводимостью в нем можно управлять только посредством инжекции носителей из металлического электрода.

В реальном диэлектрике, который характеризуется тепловыми колебаниями узлов решетки, наличием нейтральных или заряженных примесей и структурных дефектов, носители будут испытывать значительное рассеивание. Кроме того, носители заряда захватываются ловушками, энергетические уровни которых находятся в запрещенной зоне. При этом образуется пространственный неподвижный заряд, снижающий величину тока.

Отсюда следует, что для получения больших плотностей тока (крутой прямой характеристики) структура полупроводниковой пленки должна обладать возможно большим совершенством. Совершенство структуры в свою очередь обусловливает получение крупных кристаллов и обеспечение стехиометрического состава (т. е. состава, соответствующего химической формуле) полупроводниковой пленки. В этом заключается основная технологическая трудность изготовления аналоговых диодов и основная причина низкой воспроизводимости их характеристик.

Примером аналогового диода может служить диод со структурой Te — CdS — In (теллур — сульфид кадмия — индий). В этой структуре используется относительно толстая (несколько микрометров) пленка CdS, в качестве инжектирующего электрода In, в качестве блокирующего (запирающего) электрода Te. Широкая запрещенная зона CdS ($\Delta E=2{,}4$ эВ) обеспечивает возможность работы прибора при повышенных температурах.

На подложку вначале напыляется теллур, затем сульфид кадмия, потом индий. Пленка CdS напыляется на подложку, нагретую до 200° С, при этом сопротивление пленки составляет 10^2—10^4 Ом·см. При более высокой температуре подложки скорость конденсации становится слишком низкой вследствие явления отражения.

Относительно низкое сопротивление пленки объясняется ее примесной электропроводностью вследствие от-

---

* Это название нередко применяют к полупроводникам с широкой запрещенной зоной.

клонения пленки от стехиометрического состава (обеднение серой). Для повышения ρ напыленную пленку можно подвергнуть термической обработке в парах серы (при температуре 300° С в течение до 20 ч). При этом ρ повышается до 10^3—10^5 Ом·см. Лучший результат достигается при совместном осаждении с двух испарителей CdS (700° С) и S (95° С) при температуре подложки 300° С ($\rho = 10^6$—10^7 Ом·см).

Для увеличения размеров кристаллов и повышения подвижности носителей заряда применяют отжиг, причем в качестве катализатора в данной структуре может быть использован индий, нанесенный поверх пленки CdS. По сравнению с мелкокристаллической пленкой подвижность в результате отжига возрастает с 2 до 20 см²/(В·с) [в монокристалле CdS — 200 см²/(В·с)].

Несмотря на эти меры плотность ловушек остается высокой и в зависимости от технологических режимов колеблется в пределах 10^{14}—10^{20} см$^{-3}$.

Параметры аналоговых диодов значительно уступают параметрам полупроводниковых монокристаллических диодов (повышенное падение напряжения в прямом направлении, пониженная плотность тока и т. д.).

В туннельных диодах используется возможность туннельного прохождения электронов через достаточно тонкие диэлектрические пленки. Если высота потенциального барьера превышает энергию электрона, то в отличие от классической частицы электрон имеет конечную вероятность его преодоления. Эта вероятность тем больше, чем больше прозрачность барьера. Последняя увеличивается с повышением энергии электрона (приложенного к диоду прямого напряжения) и уменьшением ширины барьера (толщины пленки). Существенно отметить, что с повышением напряжения на диоде ширина барьера уменьшается (при неизменной толщине пленки) вследствие относительного смещения энергетических уровней в металлах электродов.

Как и аналоговый, туннельный диод представляет собой трехслойную структуру металл — полупроводник (диэлектрик) — металл; причем диодную характеристику получают путем подбора материалов электродов с соответствующей работой выхода.

Основные требования к пленочным туннельным диодам, обеспечиваемые технологическим процессом изготовления, следующие:

1) высокая воспроизводимость толщины диэлектрической пленки, так как сопротивление пленки очень чувствительно к толщине. Например, при напряжении 0,5 В и увеличении толщины с 35 до 40Å сопротивление увеличивается в 100 раз;

2) высокая однородность по толщине и составу пленки, в частности беспористость, что необходимо для обеспечения приемлемых пробивных напряжений.

Дополнительным требованием является отсутствие диффузии металла электрода в диэлектрик, так как при тонком диэлектрике это приводит к закорачиванию электродов.

С точки зрения воспроизводимости толщины и однородности пленки наилучшие результаты достигаются при окислении металла нижнего электрода в электролите (метод анодирования). В этом случае материал нижнего электрода должен быть особо чистым, чтобы окисная пленка была бездефектной.

Недостатком электролитического окисления является загрязнение окисной пленки гидроокисью, а также плохая технологическая совместимость с другими элементами интегральной схемы. Непосредственное испарение диэлектрика в вакууме приводит, как известно, к образованию пористой пленки.

Термическое окисление металла электрода характеризуется низкой производительностью в связи с систематическим уменьшением скорости роста пленки (для Al_2O_3, например, при толщине 60Å скорость роста практически равна нулю).

В настоящее время отсутствуют технологические методы, удовлетворяющие полностью указанным требованиям.

Экспериментальные образцы туннельных диодов получены, например, на основе структуры $Al - Al_2O_3 - Al$. Несимметричная характеристика в данном случае обусловлена различием свойств пограничных слоев металл — диэлектрик вследствие различия технологии.

Пленочный триод. При разработке пленочных триодов используются те же механизмы электропроводности, что и в диодах. Добавление третьего электрода имеет целью модулировать электропроводность пленки.

Удачной разработкой в этой области является пленочный полевой триод, одна из наиболее технологичных модификаций которого показана на рис. 2.26, *б*.

В приборе используется эффект поля, т. е. изменение концентрации подвижных носителей заряда в поверхностном слое полупроводниковой поликристаллической пленки за счет электрического поля управляющего электрода — затвора *2*. На подложку вначале наносится полупроводниковая пленка сульфида кадмия CdS (или селенида кадмия CdSe, или арсенида галлия GaAs) и выполняется необходимая термическая обработка. Далее напыляются два золотых электрода (исток *1* и сток *4*). Затем в образовавшийся зазор с некоторым перекрытием электродов напыляется диэлектрик *3* (например, моноокись кремния). Поверх диэлектрической пленки наносится затвор *2* (например, Al).

При подаче напряжения между истоком *1* и стоком *4** в полупроводниковой пленке возникают токи, ограниченные пространственным зарядом. С помощью затвора в пленке создается поперечное поле. В результате часть подвижных носителей оказывается связанной на поверхности пленки, а плотность подвижных носителей уменьшается. При подаче на затвор постоянного смещения и переменного сигнала прибор становится усилительным элементом.

Существенное влияние на характеристику триода оказывает длина зазора l, с уменьшением которого возрастает крутизна и предельная частота. Крутизна может быть повышена и за счет увеличения ширины w, однако при этом ухудшаются частотные свойства прибора из-за повышения емкости. По этой же причине диэлектрическая пленка должна быть достаточно толстой (0,1—0,15 мкм), а значение ε — умеренным. Малая (10—30 мкм) и хорошо воспроизводимая длина зазора обеспечивается методом фотолитографии.

Полевые пленочные триоды по своим параметрам близки к транзисторам, но выгодно отличаются от них высоким входным сопротивлением (порядка 10^6 Ом).

Технологической проблемой является обеспечение хорошей воспроизводимости характеристик приборов, которая в основном зависит от воспроизводимости структуры и состава полупроводниковой поликристаллической пленки.

---

* Полевой пленочный триод является униполярным прибором благодаря конструктивной симметрии.

В то же время монокристаллические МДП-приборы, являющиеся аналогом пленочных полевых триодов в полупроводниковых ИС (см. гл. 1), давно перешли из стадии лабораторных разработок в серийное производство.

Аморфные и стеклообразные полупроводниковые материалы. С 1966 г. в нашей стране и за рубежом проводятся широкие исследования аморфных и стеклообразных полупроводниковых материалов, к которым относятся халькогениды мышьяка, сурьмы, таллия и германия, многокомпонентные материалы, содержащие As, Ge, Si, Se и Te, некоторые оксихалькогенидные материалы и аморфный селен.

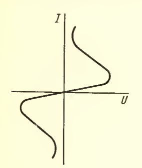


Рис. 2.27. Вольт-амперная характеристика витрода

Электрофизическая особенность указанных материалов заключается в низких значениях подвижности носителей заряда [10^{-1}—10^{-7} см²/(В·с)], вследствие чего удельное темновое сопротивление* велико (10^{11}—10^{14} Ом·см) даже при относительно малой ширине запрещенной зоны (1,2—1,8 эВ).

Другая особенность — отсутствие влияния примесей (по крайней мере до 0,1%) на электрические свойства материала. Кроме того, данные материалы обладают высокой радиационной стойкостью (свыше 10^{17} нейтрон/см²).

Технологические преимущества стеклообразных полупроводников (СПП) состоят в том, что их электрические характеристики слабо зависят от структуры и содержания примесей. Первое объясняется тем, что в СПП, представляющем неупорядоченную систему, электрические свойства определяются лишь ближним порядком в расположении атомов; второе тем, что в условиях высокой плотности центров захвата примеси не являются электрически активными (сравните явление, сопровождающее ионное легирование, гл. 1).

Наибольший интерес для вычислительной техники представляет эффект переключения, проявляю-

* Большинство рассматриваемых материалов характеризуется значительной фотопроводимостью.

щийся в образцах с S-образной в. а. х. (рис. 2.27). Такой прибор, называемый витродом, имеет в качестве аналогов кристаллические полупроводниковые приборы — динисторы и тиристоры. Но витроды отличаются следующими преимуществами: 1) униполярностью, т. е. возможностью работы при любой полярности управляющего напряжения; 2) простотой изготовления; 3) возможностью пленочного исполнения на пассивной подложке; 4) высокой радиационной стойкостью.

В СПП наблюдается также эффект переключения с памятью. Состояние, достигнутое после переключения, может существовать практически бесконечно и для «стирания» информации через элемент пропускается короткий импульс (1—10 мкс) сильного тока. Возможный механизм этого явления — обратимый структурный переход стекло — кристалл, в результате которого проводимость меняется на несколько порядков.

Общим недостатком витродов и элементов памяти является ограниченное число переключений (по различным источникам от 10^6 до 10^{12}).

Большинство СПП имеет дырочную электропроводность. В ряде материалов (аморфный селен, аморфный Sb_2S_3 и др.) доминирующей является электронная электропроводность. Таким образом, существует возможность создания гетероструктур, обладающих выпрямляющими свойствами. Коэффициент выпрямления диода на основе, например, гетероструктуры $Se — AsSbS_3$ имеет значения 10^3—10^4. Особенностью гетероструктур является сильная зависимость электрических параметров от толщины слоев, составляющих гетероструктуру.

Обладая разнообразными оптическими и фотоэлектрическими свойствами, СПП могут оказаться перспективными для использования их в ЭВМ пятого поколения.

§ 2.6. Некоторые сведения о технологии высокого вакуума

Схема вакуумной системы установки для напыления тонкопленочных микросхем. Типичная схема вакуумной системы представлена на рис. 2.28. Для откачки объема колпака *7* от атмосферного давления до предельного вакуума с помощью форвакуумного насоса *ФВН* через открытые вентили *3* и *4* создают давление под колпаком *7* до 10^{-1}—10^{-2} мм рт. ст., контролируя давление с помощью

термопарного манометра *2*. После этого вентиль *3* закрывают, открывают вентиль *5* и высоковакуумный затвор *1* и откачивают всю вакуумную систему до давления 10^{-1}—10^{-2} мм рт. ст. Затем включают подогреватель высоковакуумного диффузионного насоса *ВВН* и производят откачку колпака через затвор *1* до предельного вакуума (10^{-6}—$5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.), контролируя давление с помощью ионизационного манометра *6*. При этом *ФВН* должен постоянно отсасывать в атмосферу из *ВВН* остаточный газ. Поскольку в форбаллоне *ФБ* поддерживается

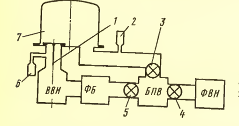


Рис. 2.28. Схема вакуумной системы установки для напыления тонкопленочных микросхем

форвакуум 10^{-1}—10^{-2} мм рт. ст., возможно кратковременное отключение *ФВН* от *ВВН*. В этом случае выход *ВВН* будет нагружен только на *ФБ*. По окончании цикла напыления напуск осушенного воздуха в *ФВН* и колпак производится через вентили *3* и *4*. Управление вентилями и их блокировка осуществляются с помощью блока переключения вакуума *БПВ*.

При выборе материалов для вакуумных систем необходимо учитывать скорость десорбции и газопроницаемость. Из металлов наиболее подходящим материалом является нержавеющая сталь. Этот материал обладает низкой скоростью десорбции, т. е. низкой скоростью газоотделения с единичной поверхности. Материал устойчив против коррозии, что позволяет использовать химически агрессивные жидкости для очистки подколпачных устройств, хорошо полируется, вследствие чего в неровностях шероховатой поверхности не накапливаются гигроскопичные вещества и активные сорбенты. В то же время малоуглеродистая сталь плохо удовлетворяет требованиям вакуумной техники, поскольку окисный слой на ее поверхности обладает высокой сорбционной емкостью. Применение латуни в вакуумной технике не рекомендуется из-за заметного испарения цинка при температуре свыше 300° С.

Наименьшей скоростью десорбции из пластических материалов обладает политетрафторэтилен (фторопласт). Недостатком этого материала является хладотекучесть, что препятствует использованию его в качестве прокладок, уплотнений. При нагреве до температур около 300° С материал диссоциирует без расплавления. Наименьшей скоростью десорбции и газопроницаемостью после фторопласта обладает витон (сополимер гексафторпропена и фтористого винилидена). Витон допускает без потери эластичных свойств длительный прогрев до 180—200° С и кратковременный до 250° С.

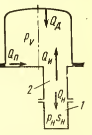


Рис. 2.29. Схема процесса откачки вакуумного колпака

Вакуумная резина обладает большей скоростью десорбции и газопроницаемостью, чем витон, но большая эластичность обусловливает широкое применение этого материала в качестве вакуумных шлангов, уплотнительных сальников, прокладок. Вакуумная резина при температурах 90—100° С теряет свои эластичные свойства.

Откачка сосредоточенного объема. Схема процесса откачки вакуумного колпака, под которым проводятся технологические процессы напыления, представлена на рис. 2.29. Работа вакуумного насоса характеризуется скоростью откачки $s_н$ [в л/с], т. е. объемом газа при данном давлении, удаляемым насосом за единицу времени. Скорость откачки многих насосов в широкой области давлений приблизительно постоянна.

Поток газа, откачиваемый в единицу времени,

$$Q_V = p_V s_н \text{ [мм рт. ст.}\cdot\text{л/с]}, \qquad (2.14)$$

где p_V — давление в месте измерения потока газа; $s_н = dV/dt$ — скорость откачки в насосе.

Проводимость трубопровода *2*, соединяющего вакуумный насос с откачиваемым объемом, определяется отношением потока к разности давлений в насосе $p_н$ и под колпаком p_V:

$$C = Q/\Delta p \text{ [л/с]}, \qquad (2.15)$$

где $\Delta p = p_V - p_н$.

При откачке колпака через трубопровод *2* в условиях низкого вакуума, т. е. при вязкостном потоке газа (длина свободного пробега молекул мала по сравнению с размерами колпака) проводимость C зависит от диаметра, длины и среднего давления в трубопроводе.

При откачке колпака в условиях высокого вакуума (молекулярный поток) проводимость C зависит только от диаметра и длины трубопровода.

При параллельном соединении трубопроводов

$$C = C_1 + C_2 \text{ [л/с]}, \qquad (2.16)$$

при последовательном

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2. \qquad (2.17)$$

На рис. 2.29 откачиваемый поток газа Q в любом сечении трубопровода *2* постоянен. В то же время давление под колпаком p_V больше давления в насосе $p_н$, иначе не было бы откачиваемого потока Q.

В сечении насоса *1* поток газа

$$Q_н = s_н p_н, \qquad (2.18)$$

где $s_н$, $p_н$ — соответственно скорость откачки и давление в насосе.

В сечении трубопровода *2* у колпака поток газа

$$Q_V = s_э p_V, \qquad (2.19)$$

где $s_э$ — эффективная скорость откачки в этом сечении; p_V — давление под колпаком.

Из равенств (2.18) и (2.19) можно сделать вывод, что $s_э < s_н$. В то же время поток газа Q выражается через проводимость C на основании (2.15):

$$Q = C(p_V - p_н). \qquad (2.20)$$

Приравнивая (2.18), (2.19) и (2.20), получим

$$s_э = \frac{s_н C}{s_н + C}, \text{ л/с}. \qquad (2.21)$$

На рис. 2.29: $Q_д$ — поток газа, десорбирующийся с поверхности колпака; $Q_п$ — поток газа, проникающий под колпак извне; $Q_н$ — поток газа, поступающий из насоса в откачиваемую систему.

Основным уравнением, описывающим процесс откачки, является

$$-Vdp = dt(s_э p - Q_д - Q_п - Q_и). \qquad (2.22)$$

Количество газа, удаленного из сосуда в течение времени dt, равно количеству газа, проходящего через насос, за вычетом количества газа, поступающего из трех источников. Знак минус означает, что dp отрицательно — это соответствует уменьшению давления. После окончания начального периода откачки $Q_д$, $Q_п$ и $Q_и$ остаются единственными источниками газа в объеме V. В конце установится равновесие, после чего давление не будет уменьшаться. Когда достигнуто предельное давление p_0, то $dp/dt = 0$ и

$$p_0 s_э = Q_д + Q_п + Q_и; \qquad (2.23)$$

откуда

$$s_э = \frac{\Sigma Q_i}{p_0}. \qquad (2.24)$$

Решение уравнения (2.22) свидетельствует о зависимости давления под колпаком от времени t:

$$p_V = p e^{-s_э t/V} + p_0, \qquad (2.25)$$

где p — начальное давление под колпаком.

При $p_V \gg p_0$ постоянная времени $\tau = V/s_э$. Эта величина пригодна для оценки эффективности действия откачной системы.

Для увеличения $s_э$ необходимо увеличение проводимости C трубопровода *2* с тем, чтобы возможно полно использовалась скорость откачки насоса *1*. Обычно выбирают $C \approx s_н$ или несколько больше.

Вакуумные насосы. В установках для изготовления тонкопленочных микросхем применяют следующие основные способы откачки:

1) периодическое изменение объема рабочей камеры (механические форвакуумные насосы);

2) захват остаточного газа струей рабочей жидкости или пара (пароструйные насосы);

3) сорбция молекул остаточного газа (сорбционные насосы);

4) ионизация молекул остаточного газа и удаление ионов электрическим полем (ионно-сорбционные и геттерно-ионные насосы);

5) конденсирование остаточного газа при очень низких температурах (вымораживатели).

Кроме скорости откачки $s_н$ насосы характеризуются также предельным минимальным давлением на входе, которое показывает, какое наименьшее давление может быть достигнуто в системе, и максимальным давлением на выходе.

Форвакуумные насосы уменьшают величину давления в системе от атмосферного до значения, при ко-

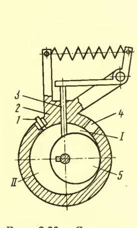


Рис. 2.30. Схема пластинчато-статорного форвакуумного насоса

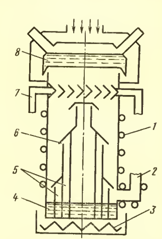


Рис. 2.31. Схема диффузионного насоса

тором способны действовать высоковакуумные насосы (10^{-2}—10^{-1} мм рт. ст.).

Принцип работы пластинчато-статорного насоса, показанного на рис. 2.30, состоит во всасывании впускным клапаном *4* остаточного газа, происходящем вследствие расширения объема камеры всасывания *I*, сжатии этого газа при последующем вращении ротора и выталкивании его через клапан *1*. С помощью разделительной пластины *3* при вращении ротора *5* в объеме статора *2* образуются две камеры: камера всасывания *I* (расширяющийся объем) и камера сжатия *II* (уменьшающийся объем). У пластинчато-роторных насосов разделительная пластина находится на роторе.

Качество работы форвакуумных насосов зависит от точности пригонки всех трущихся деталей, качества масла, которое покрывает все трущиеся поверхности и тем самым создает непроницаемость для откачиваемого газа в подвижных сочленениях. Вследствие высокой скорости откачки, простоты, надежности механические форвакуумные насосы широко применяют в вакуумных установках.

Высоковакуумные пароструйные или диффузионные насосы применяют для получения давления под колпаком до 10^{-5}—10^{-7} мм рт. ст.

В диффузионных насосах (рис. 2.31) плотный пар рабочей жидкости (масла или ртути) вытекает из сопел *6* с большой скоростью. Диффундирующие в пар молекулы остаточных газов увлекаются в направлении входа в форвакуумный насос.

В нижней части насоса находится испаритель с электронагревателем *3*. Пар поднимается вверх по концентрическим паропроводам *5*, включающим систему трех кольцевых сопел. Верхнее сопло предназначается для работы при наиболее низком давлении. Над этим соплом находится водоохлаждаемый маслоотражатель *7*, а выше отражателя устанавливаются ловушки *8*. Маслоотражатель *7* служит для конденсации рабочей жидкости *4* и возвращения ее в испаритель. Ловушка *8* представляет собой охлаждаемую поверхность, в которой конденсируется пар рабочей жидкости. Обычно ловушки охлаждаются жидким азотом. Пар направляется соплом вниз к стенке насоса, водоохлаждаемой с помощью змеевика *1*. Там он конденсируется и рабочая жидкость стекает в испаритель. Откаченный газ удаляется через форвакуумную линию *2*.

В качестве рабочей жидкости применяют высокомолекулярные нефтяные масла специальной перегонки и кремнийорганические жидкости. Масла ВМ-1, ВМ-5 позволяют получать разрежение 10^{-6} мм рт. ст. Нагретые масла ВМ-1, ВМ-5 при соприкосновении с остаточным газом давлением 10^{-1} мм рт. ст. окисляются и теряют свои вакуумные свойства. Поэтому перед подключением диффузионного насоса к откачиваемому объему необходимо получить в нем давления не выше 10^{-1} мм рт. ст. Кремнийорганические жидкости обладают повышенной окислительной стойкостью и способны выдержать длительное нагревание до температуры 150—200° С при контакте с атмосферой.

Преимуществами диффузионных насосов являются их надежность, простота и высокая скорость откачки, которая не зависит от колебаний нагрузки.

Существенным недостатком диффузионных насосов считают попадание молекул масла в откачиваемые вакуумные камеры. Молекулы масла, проникая в технологический объем и оседая на подложках, загрязняют пленку и снижают ее адгезию к подложке.

Диффузионный высоковакуумный насос является основным типом, применяемым в производственных вакуумных установках.

Сорбционные форвакуумные насосы основаны на способности предварительно обезгаженных поверхностей поглощать газы за счет физической адсорбции. Для увеличения интенсивности адсорбции активную поверхность (губчатое вещество с порами размером в несколько ангстремов) охлаждают жидким азотом, а для регенерации — нагревают. Главными недостатками являются: большой расход жидкого азота, плохая откачка водорода, имеющего наименьший размер молекул, и инертных газов.

В высоковакуумных сорбционных насосах используются свойства некоторых веществ поглощать газы путем физической сорбции, хемосорбции, а также химических реакций. Такие вещества называют геттерами. Газ поглощается свежеосажденным на внутреннюю полость насоса слоем титана, титано-молибденового сплава или хрома при термическом, катодном или электродно-лучевом распылении.

Сорбционная откачка имеет следующие преимущества: отсутствует загрязнение откачкой системы парами рабочего вещества; при непрерывном осаждении адсорбирующего слоя непосредственно на стенки откачиваемого объема может быть достигнута высокая скорость откачки. Однако для высокой скорости откачки необходимы большие площади адсорбирующего вещества, повышение температуры приводит к выделению физически адсорбированных газов.

В ионно-сорбционных насосах газ ионизируется. Ионы захватываются металлической поверхностью, находящейся под отрицательным потенциалом, чаще всего титановой, которая наряду с этим представляет собой и сорбционный насос. Ионная откачка способствует удалению несорбирующихся газов.

В геттерно-ионных насосах для увеличения интенсивности сорбирования на катод, который притягивает ионы газа, непрерывно осаждаются в процессе откачки новые слои металла-геттера.

Турбомолекулярные высоковакуумные насосы основаны на принципе сообщения оставшимся в высоком вакууме молекулам газа направленного движения за счет очень быстро движущейся поверхности. Перепад давлений пропорционален скорости, площади поверхности и молекулярному весу газа. Чтобы избежать

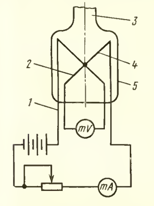


Рис. 2.32. Схема термопарного манометра:
1 — вывод питания; 2 — термопара; 3 — присоединительная трубка; 4 — нить накала; 5 — колба

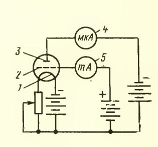


Рис. 2.33. Схема включения ионизационного манометра:
1 — катод; 2 — сетка; 3 — коллектор; 4, 5 — приборы контроля тока электронов и ионов

чрезмерного нагрева частей насоса вследствие трения, необходимо предварительное разрежение. При применении магнитных подшипников скорость ротора в современных насосах доходит до 100 000 об/мин. Насосы позволяют достичь вакуума до 10^{-9} мм рт. ст., экономичны, но чувствительны к вибрации фундамента здания.

Измерение низких давлений. Наиболее распространенными манометрами полного давления остаточных газов вследствие своей надежности, простоты и точности являются термопарные и ионизационные.

В термопарном манометре (рис. 2.32) термопары *2* приваривают к проволоке, через которую пропускается стабилизированный ток. Температура проволоки поддерживается около 200° С. Температуры проволоки

и спая термопары (а, следовательно, э. д. с. термопары) зависят от интенсивности и механизма теплообмена с окружающей средой.

В диапазоне давлений $5\cdot10^{-1}$—10^{-3} мм рт. ст. основным механизмом теплообмена является теплопроводность, т. е. тепловая энергия разогретой проволоки и термопары преобразуется в кинетическую энергию молекул остаточного газа. В этом случае с уменьшением давления температура спая увеличивается и соответственно увеличивается термо-э. д. с., причем ее увеличение будет пропорционально уменьшению плотности остаточного газа, т. е. разрежению.

В области более низких давлений преимущественный механизм теплообмена — излучение, вследствие чего температура спая и э. д. с. изменяются с изменением давления ничтожно. Таким образом, термопарные манометры используют для измерения давлений до 10^{-3} мм рт. ст.

Ионизационный манометр (рис. 2.25 и 2.33) представляет собой стеклянный баллон, один конец которого включен в откачиваемую систему. Проволочный катод *1* окружен редкой сеткой *2*, которую в свою очередь окружает коллектор *3*. Коллектор *3* находится под напряжением −30 В, сетка — под напряжением +180 В. Электроны, эмиттируемые катодом *1*, устремляются к сетке *2*. Сталкиваясь с молекулами газа, электроны ионизируют их. Определенное число ионов перемещается к коллектору *3*. Этот ионный ток и является характеристикой плотности газа:

$$i_и = s i_э p, \tag{2.26}$$

где s — коэффициент пропорциональности (чувствительность манометра); $i_э$ — электронный стабилизированный ток катода; p — давление.

Вследствие того, что катод разогрет до температуры термоэмиссии, возможно измерение давлений ниже 10^{-3} мм рт. ст. Эксплуатация манометра при давлениях выше 10^{-3} мм рт. ст. приводит к быстрому окислению катода.

§ 2.7. Принципы компоновки многопозиционных вакуумных установок

Общие сведения об МПВУ. При организации серийного или массового производства изделий всегда стоит за-

дача сокращения доли вспомогательного времени, приходящегося на одно изделие.

Применительно к процессам термического вакуумного напыления, катодного распыления и другим процессам, связанным с обработкой микросхем в вакууме, вспомогательное время (помимо установки и снятия подложек) включает в себя время на откачку системы до рабочего вакуума.

Для получения рабочего вакуума порядка 10^{-6}—$5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. затрачивается время до 1,5—2 ч (даже при разогретом диффузионном насосе). Так как время напыления отдельного слоя редко превышает 1—1,5 мин, понятно стремление использовать многопозиционные вакуумные установки, позволяющие, не нарушая вакуума (за один вакуумный цикл), последовательно или одновременно обрабатывать несколько подложек. Эффект становится еще более значительным, если при этом применяют групповые подложки. Обычно используют групповые ситалловые подложки стандартного размера $60 \times 48 \times 0{,}6$ мм.

По степени непрерывности процесса обработки МПВУ могут быть разделены на 2 группы:

1) однокамерные МПВУ периодического действия;

2) многокамерные МПВУ полунепрерывного или непрерывного действия.

Установки первой группы работают по следующему циклу: установка подложек — откачка рабочего объема — обработка (напыление) — снятие вакуума и вскрытие — снятие обработанных подложек. Для таких установок характерны два момента: 1) вспомогательное время на откачку не перекрывается с основным технологическим временем; 2) установка подложек и их совмещение с масками выполняется вручную (непосредственно или через соответствующие механизмы).

В установках второй группы откачка частично (МПВУ полунепрерывного действия) или полностью (МПВУ непрерывного действия) совмещается с основным процессом обработки. Это достигается с помощью многокамерной системы с различным уровнем вакуума в отдельных камерах. В подобных установках целесообразно выполнять полный цикл изготовления микросхемы, т. е. напылять все слои, поэтому в обработке одновременно (на разных стадиях) находится несколько подложек. Управление в таких установках (транспортировка подложек и уста-

новка их в рабочие позиции) осуществляется автоматически. Таким образом, установки второй группы представляют собой автоматические линии.

Однокамерные МПВУ периодического действия. Однокамерная установка периодического действия имеет подколпачное многопозиционное устройство карусельного типа, которое выполняют в одном из двух вариантов: 1) в каждой позиции карусели устанавливают подложку в комплекте с накладной маской (если таковые используют в данном процессе); 2) на карусели устанавливают только подложки, а маски размещают в неподвижном многопозиционном диске и, таким образом, подложка, переходя из позиции в позицию, последовательно совмещается с различными масками.

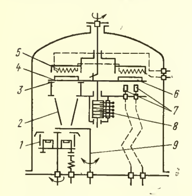


Рис. 2.34. Схема подколпачного устройства установки УВН-2М-2:

1 — карусель испарителей; *2* — экраны; *3* — диафрагма; *4* — карусель масок и подложек; *5* — нагреватель подложек; *6* — имитатор с датчиками температуры и сопротивления пленки; *7* — электроды ионной очистки; *8* — коллектор; *9* — заслонка

В установках первого типа обычно имеется одна рабочая позиция (позиция напыления) и поэтому в каждый момент времени обрабатывается лишь одна подложка.

К установкам этого типа относится установка УВН-2М-2, упрощенная схема подколпачного устройства которой представлена на рис. 2.34. В данном случае карусель подложек и масок имеет 8 позиций и может непрерывно вращаться со скоростью 40—150 об/мин. Это обеспечивает идентичность свойств пленки на всех подложках. На базовой плите смонтирована 5-позиционная карусель резистивных испарителей таким образом, что питание подается только на тот испаритель, который выведен на рабочую позицию.

Технологические возможности такой установки в основном заключаются в следующем:

1) напыление элементов одного слоя через маски;

2) напыление двух сплошных слоев (например, резистивного и проводящего) без применения накладных масок с последующей двухкратной фотолитографией.

Подколпачное устройство включает в себя также систему ионной очистки, установленную неподвижно в одной из позиций, систему нагрева подложек, датчики контроля сопротивления и толщины наносимой пленки. С увеличением числа позиций сокращается доля вспомогательного времени откачки, приходящегося на одну подложку.

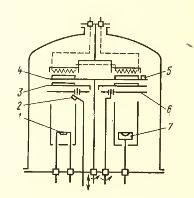


Рис. 2.35. Схема подколпачного устройства установки УВН-2М-1:

1 — резистивный испаритель; 2 — датчик контроля толщины пленки; 3 — диск с масками; 4 — карусель подложек; 5 — датчик контроля сопротивления пленки; 6 — заслонка, 7 — электронно-лучевой испаритель

В установках второго типа имеется несколько рабочих позиций, в каждой из которых стационарно смонтирован испаритель и соответствующая маска. Подложки размещаются на карусельном устройстве. Переводя подложки из позиции в позицию и осуществляя совмещение их с неподвижными масками, можно последовательно сформировать элементы всех слоев, т. е. выполнить полный цикл напыления микросхем. Обработка выполняется одновременно (на разных стадиях) во всех позициях. Очередная индексация карусели (смена позиций) осуществляется после завершения наиболее длительного технологического перехода, т. е. имеет место сокращение *основного технологического времени*, приходящегося на одну подложку.

Примером установки данного типа является установка УВН-2М-1, схема подколпачного устройства которой изображена на рис. 2.35. Подложки располагаются на 6-позиционной карусели, маски — на 6-позиционном не-

подвижном диске. На базовой плите равномерно по окружности размещены неподвижно 6 испарителей: 5 резистивных и 1 электронно-лучевой (для испарения тугоплавких материалов). Позиции испарения взаимно защищены экранами. Привод поворота карусели вначале приподнимает ее, выводя фиксирующие штифты из базовых отверстий, затем поворачивает на 60° и опускает на диск с масками. При этом штифты вновь входят в отверстия, а маски, имеющие плавающую конструкцию, плотно прижимаются к подложкам.

Основные технические характеристики установки УВН-2М-1

Предельный вакуум в рабочей камере	$5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.
Время достижения предельного вакуума при разогретом паромасляном насосе	90 мин
Быстрота откачки:	
высоковакуумного насоса Н-2Т	1500 л/с
низковакуумного насоса ВН-7Г	7 л/с
Размеры рабочей камеры	Ø 500×640 мм
Максимальная температура нагрева рабочей камеры	90° С
Питание резистивных испарителей:	
максимальный ток	500А (5 шт.); 50А (1 шт.)
напряжение (ступени регулировки)	4, 8, 16, 32 В
Питание электронно-лучевого испарителя (ЭЛИ):	
максимальный ток	200 мА
максимальное напряжение	5 кВ
Размеры подложек	60×48×0,6 мм
Допустимая температура нагрева подложек	400° С
Точность совмещения подложки с маской при температуре 300° С	100 мкм
Максимальная потребляемая мощность	9 кВт
Расход холодной воды от магистрали с давлением 2—4 ат	400 л/ч

Расход горячей воды от магистрали с давлением 2—4 ат	200 л/ч
Габариты:	
установки с опущенным колпаком	1550×1050×1800 мм
установки с поднятым колпаком	1550×1050×2450 мм
шкафа управления ЭЛИ .	500×600×1750 мм
Масса:	
установки	800 кг
шкафа управления ЭЛИ . .	500 кг

Многокамерные МПВУ. Для частичного перекрытия времени откачки основным технологическим временем необходима «шлюзовая» многокамерная система, в которой подложки в кассетах-спутниках автоматически перемещаются из камер с относительно низким вакуумом (загрузочная камера, транспортная камера) в рабочие камеры с высоким вакуумом. При этом между двумя смежными камерами должна устойчиво поддерживаться определенная разность давлений (на 2—3 порядка) и в то же время подложка в кассете должна свободно попадать из одной камеры в другую, смежную с ней.

Возможность организации такой системы базируется на основных положениях кинетической теории газов и достижениях современной вакуумной техники.

В § 2.6 было отмечено, что для откачной системы, работающей на некоторый замкнутый объем, в установившемся режиме справедливо равенство

$$p_0 s_э = \sum_1^n Q_i,$$

где p_0 — предельное давление, мм рт. ст.; $s_э$ — эффективная скорость откачки на выходе объема, л/с; Q_i — поток газа из i-го источника, мм рт. ст.·л/с.

Источниками газовыделения являются десорбция газа с поверхности элементов подколпачного устройства и течи, через которые газ проникает извне.

Для течи, связывающей откачиваемый объем с атмосферой (или смежной камерой с повышенным давлением), можно применить соотношение (2.15):

$$C = \frac{Q}{\Delta p},$$

где C — проводимость течи, л/с; Q — поток газа через течь, мм рт. ст.·л/с; Δp — разность давлений у входа и выхода течи ($p_{0\,вх} > p_{0\,вых}$), мм рт. ст.

Рассмотрим две смежные вакуумные камеры с индивидуальными откачными системами. Камеры соединяются щелью для передачи кассеты с подложкой из камеры с давлением $p_{0\,вх}$ в камеру с давлением $p_{0\,вых}$. Принимая, что для высоковакуумной камеры данная щель является единственным источником газовыделения, и сопоставляя последние выражения, получим

$$C = \frac{s_э p_{0вых}}{p_{0вх} - p_{0вых}} = \frac{s_э}{\left(\frac{p_{0вх}}{p_{0вых}} - 1\right)}, \tag{2.27}$$

где $s_э$ — скорость откачки из высоковакуумной камеры.

Высоковакуумные паромасляные насосы современных производственных установок имеют скорость откачки 1500 л/с. Таким образом, для устойчивого сохранения разности давлений в 2 или 3 порядка проводимость щели должна быть не более 15 или 1,5 л/с соответственно.

Связь проводимости круглого трубопровода с его диаметром и длиной определяется соотношениями:

в области высокого вакуума (молекулярное течение)

$$C = 3{,}8\left(\frac{T}{M}\right)^{1/2}\frac{D^3}{L}; \tag{2.28}$$

в области умеренного вакуума (вязкостное течение)

$$C = \frac{\pi}{128}\cdot\frac{D^4}{\eta L}\bar{p}, \tag{2.29}$$

где D и L — размеры трубопровода, см; T — абсолютная температура, К; M — молекулярный вес газа, г/моль (для воздуха 29); η — вязкость газа, Пз (для воздуха при 20° С $\eta = 182\cdot10^{-6}$), $\bar{p}$ — среднее давление в трубопроводе, мм рт. ст.

Реальные многокамерные установки имеют в качестве каналов сообщения между камерами достаточно длинные прямоугольного сечения окна, в которые входят массивные кассеты прямоугольного сечения с определенным рассчитанным зазором. Для прямоугольного окна с периметром 22 см и длиной 10 см ориентировочный рас-

чет* зазора, равномерно распределенного по периметру, дает следующие значения: при перепаде давлений с 10^{-6} до 10^{-3} мм рт. ст. — порядка 0,3 мм; при перепаде давлений с 1 мм рт. ст. до атмосферного — порядка нескольких микрометров. Для увеличения зазора в последнем случае следует увеличивать длину канала сообщения (окна). Длина канала всегда должна превышать размер подложки, несколько утопленной в кассете, чтобы вводимый в высоковакуумную камеру объем воздуха над подложкой полностью отсекался кассетой от обеих камер.

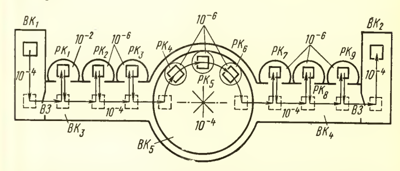


Рис. 2.36. Упрощенная схема автоматической линии полунепрерывного действия. Сплошными линиями показаны кассеты в стопках и в позициях напыления, пунктирными линиями — в промежуточных (нерабочих) положениях

На рис. 2.36 дана упрощенная схема автоматической линии полунепрерывного действия (вид в плане). Линия состоит из 9 рабочих камер (PK_1—PK_9) и 5 вспомогательных: загрузочной (BK_1), разгрузочной (BK_2), двух транспортных (BK_3 и BK_4) и выравнивателя (BK_5), являющегося одновременно и транспортной камерой. Каждая камера снабжена индивидуальной системой откачки, обеспечивающей постоянное давление, указанное на схеме.

Подложки в кассетах-спутниках установлены стопкой до 40 штук в камере BK_1. Вся стопка поджимается вверх к базовым элементам так, что верхняя кассета всегда находится в определенном исходном положении. Грейфер-

* Формулы (2.28) и (2.29) справедливы только для трубопроводов круглого сечения. Кроме того, в расчет не принимались другие источники газовыделения.

ный механизм подачи, размещенный в транспортной камере BK_3, через окно вакуумного затвора $B3$ захватывает верхнюю кассету и выводит ее в исходную позицию перед камерой PK_1. Одновременно меняют свои исходные позиции другие три кассеты, введенные ранее, причем последняя попадает в выравниватель. Поперечным ходом толкателей кассеты вводятся в соответствующие рабочие камеры PK_1, PK_2 и PK_3 (камера PK_1 предназначена для ионной очистки подложек), а карусель выравнивателя поворачивается на $^1/_8$ часть, вводя соответствующую кассету в камеру PK_4. По завершении обработки во всех рабочих камерах толкатели возвращают кассеты в исходные позиции, а грейферный механизм повторяет уже указанные движения, совершая новый такт.

Правое крыло линии работает аналогично и разница лишь в том, что грейферный механизм принимает кассеты с выравнивателя, а последнюю кассету передает в разгрузочную камеру BK_2, где происходит сборка их в стопку.

Выравниватель, содержащий 3 позиции напыления (камеры PK_4, PK_5 и PK_6), служит для расчленения особо длительного перехода (например, напыления относительно толстых пленок с малой скоростью) на два или три этапа и сокращения таким образом длительности такта работы линии.

Для выполнения загрузки и выгрузки используют вакуумные затворы $B3$, которые временно отсекают объем камеры BK_3 или BK_4 от общей системы. После загрузки (выгрузки) камера герметизируется, производится откачка до давления 10^{-4} мм рт. ст. и вакуумный затвор открывается. В процессе выполнения этих вспомогательных приемов продолжается обработка подложек, ранее введенных в установку, т. е. *вспомогательное время частично перекрывается основным технологическим временем.*

В данной линии применяют позиционную систему автоматического управления, т. е. очередной такт начинается только после срабатывания всех концевых выключателей (на схеме не показаны), что свидетельствует о полном завершении предыдущего такта.

Примером автоматической линии непрерывного действия может служить линия, разработанная фирмой «Вестерн Электроникс» (США), схема которой показана на рис. 2.37, *а*. Линия состоит из одиннадцати камер, последовательно соединенных каналами для

транспортировки кассет с подложками. Кассеты с подложками по рельсам попадают из внешнего пространства с атмосферным давлением в камеру с пониженным давлением (3,5 мм рт. ст.) и далее периодически продвигаются в камеры с постепенно понижающимся давлением. К выходу линии давление постепенно повышается до атмосферного.

В процессе работы линии через равные промежутки времени (равные такту) автоматический толкатель продвигает замкнутую цепочку кассет и промежуточных

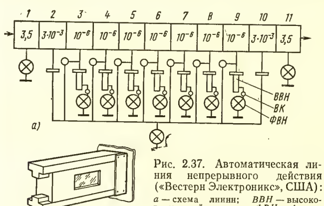


Рис. 2.37. Автоматическая линия непрерывного действия («Вестерн Электроникс», США):
а — схема линии; *ВВН* — высоковакуумный насос; *ФВН* — форвакуумный насос; *ВК* — вакуумный кран; *б* — кассета с подложкой на направляющих рельсах

ползунов (рис. 2.37, *б*) на один шаг. Таким образом, за один такт одна заготовка-подложка входит в первую камеру линии и одна обработанная подложка выходит из последней камеры.

Наличие вспомогательных камер с постепенно понижающимся и повышающимся давлением (в начале и конце линии) приводит к эффекту *полного перекрытия времени откачки основным технологическим временем*.

Характер операций, выполняемых в рабочих камерах (3—9), может быть различным в зависимости от напыляемых материалов и принятой технологии. В данном случае в пятой камере запланирована операция катодного распыления тантала для формирования резисторов. Отдельные камеры могут быть не рабочими и служить в качестве буферов, предохраняющих смежные камеры от взаимного загрязнения напыляемыми материалами.

В заключение отметим, что важной задачей при проектировании МПВУ (и особенно автоматических линий) является обеспечение испарителей достаточным количеством напыляемого материала.

Основными техническими решениями этой задачи могут быть следующие:

1) несколько стационарных резистивных испарителей с последовательным их использованием;

2) карусель сменных резистивных испарителей с последовательным их использованием;

3) резистивный испаритель с периодической загрузкой его дозированными навесками без нарушения вакуума. Загрузка может быть механизирована или автоматизирована;

4) электронно-лучевой испаритель с материалом в виде массивного образца;

5) катодное распыление с поверхности массивного катода.

§ 2.8. Распыление ионной бомбардировкой

Общие сведения. Распыление ионной бомбардировкой, как и испарение в вакууме, позволяет получать для микросхем проводящие, резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и магнитные пленки, но по сравнению с термическим вакуумным напылением имеет ряд преимуществ:

1) возможность нанесения на подложку сложных соединений и сплавов без нарушения исходного состава;

2) возможность получения пленок из тугоплавких металлов, перспективных для микроэлектроники;

3) возможность получения окисных, нитридных и других пленок за счет химического взаимодействия распыляемого материала с вводимыми в камеру химически активными газами (реактивное катодное распыление);

4) равномерность толщины наносимых пленок на большой площади благодаря использованию источника (мишени) с большой площадью плоской поверхности;

5) длительное использование мишени в качестве источника материала, что повышает однородность процесса и упрощает задачу автоматизации;

6) высокая адгезия пленки к подложке благодаря большой энергии конденсирующихся атомов;

7) малая инерционность процесса.

Для распыления мишени используют ионы инертных

газов (чаще других аргон с содержанием примесей не более 0,3%) с энергией от нескольких сотен до нескольких тысяч электрон-вольт.

Источником ионов является либо тлеющий разряд (самостоятельный газовый разряд в разреженном газе), либо плазма несамостоятельного газового разряда. В соответствии с этим различают катодное и катодноплазменное (ионно-плазменное) распыление.

Физические основы катодного распыления. Тлеющий разряд создается в разреженном газе (10^{-1}—10^{-3} мм рт. ст.) при приложении к катоду-мишени (рис. 2.38) отрицательного потенциала относительно заземленного анода, превышающего потенциал зажигания. При катодном распылении используется самостоятельный разряд, возбуждаемый автоэлектронной эмиссией.

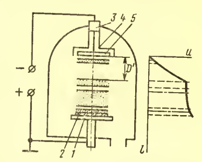


Рис. 2.38. Схема катодного распыления (двухэлектродная система) и распределение потенциала в пространстве между катодом и анодом:

1 — столик-анод; 2 — подложка; 3 — изолятор; 4 — экран; 5 — катод-мишень

Для тлеющего разряда характерно определенное распределение потенциала, обусловленное расположением пространственных зарядов. Как видно из рис. 2.38, основная часть приложенного напряжения падает на темном катодном пространстве, что объясняется большой разностью концентраций положительных ионов на границах катодного пространства. В положительном столбе концентрация ионов и электронов примерно одинакова и весьма высока, что обеспечивает ему высокую проводимость и незначительное падение напряжения. Положительный столб характеризуется диффузионным встречным движением электронов и ионов. Достигая границы темного катодного пространства, положительный ион газа сильно ускоряется и ударяет о поверхность катода, выбивая атомы материала. Электроны, эмиттируемые катодом и ускоряемые в темном катодном пространстве, способны бомбардировать молекулы газа, ионизируя их.

. Основной характеристикой, определяющей производительность катодного распыления, является коэффициент распыления $k_р$.

Коэффициент распыления зависит от энергии иона $E_и$, его массы, угла падения, материала мишени, температуры и состояния поверхности. Экспериментальное определение коэффициента распыления сводится к взвешиванию мишени до и после распыления, вычислению количества распыленных атомов с помощью числа Авогадро и определению числа ионов, достигших поверхности мишени за данный отрезок времени.

Число ионов, достигших мишени

$$N = It/q, \tag{2.30}$$

I — величина постоянного тока, А; $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ — заряд электрона, Кл; t — время распыления, с.

В табл. 2.4 приведены коэффициенты распыления некоторых металлов. Коэффициент распыления необходимо рассматривать как случайную величину, обладающую определенными статистическими характеристиками.

Таблица 2.4

Распыляемое вещество	Коэффициент распыления			
	при $E_и$=600 эВ		при $E_и$=1000 эВ	
	Ar	Kr	Ar	Kr
Cu	2,3	2,8	3,2	3,4
Fe	1,3	1,2	1,4	1,4
Mo	0,9	1,1	1,1	1,2
Ni	1,5	1,5	2,1	1,7

Таким образом, увеличение коэффициента распыления возможно за счет увеличения как энергии ионов, так и молекулярного веса газов, в среде которых происходит распыление.

Единой теории, объясняющей механизм катодного распыления, пока не существует. Одной из теорий является теория «горячего пятна», которая объясняет распыление термическим испарением локально нагретого участка мишени вследствие бомбардировки ионами. Существуют также различные гипотезы о химическом взаимодействии заряженной частицы с распыляемым вещест-

вом и образованием на поверхности мишени летучих соединений.

Наиболее удачно экспериментальные результаты по катодному распылению объясняются с позиций импульсного механизма. Движущийся на катод ион газа передает свою энергию атомам решетки в серии последовательных столкновений. При достаточной энергии атом решетки может быть смещен из положения равновесия, которое он занимал в узле решетки, и его свободная энергия может оказаться больше работы выхода.

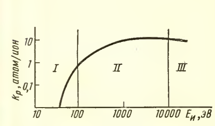


Рис. 2.39. Зависимость коэффициента катодного распыления Cu ионами Ar от их энергии:

I — распыление отсутствует или слабое; *II* — интенсивное распыление; *III* — распыление уменьшается в силу увеличения глубины проникновения иона в распыляемую поверхность

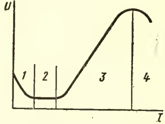


Рис. 2.40. Вольт-амперная характеристика самостоятельного газового разряда: *1* — область зажигания разряда; *2* — нормальный тлеющий разряд; *3* — аномально тлеющий разряд; *4* — дуговой разряд

Эту точку зрения подтверждают следующие экспериментальные результаты:

1) существует пороговая энергия иона, ниже которой распыления не происходит;

2) энергия распыленных атомов на 1—2 порядка превышает энергию термически испаренных атомов. Среднее значение энергии осаждаемых атомов 5 эВ, что соответствует абсолютной температуре 58 000 К;

3) имеется тенденция наилучшего распыления атома вдоль плотной упаковки кристалла;

4) коэффициент распыления $k_р$ при очень больших энергиях ионов уменьшается вследствие глубокого проникновения ионов в тело мишени (рис. 2.39);

5) коэффициент распыления зависит от угла падения иона;

6) температура мишени почти не влияет на коэффициент распыления.

Типичная вольт-амперная характеристика самостоятельного газового разряда при низком давлении показана на рис. 2.40. При достижении критического напряжения наблюдается резкий пробой газового промежутка. Критическое напряжение, до которого распыление катода практически отсутствует, составляет 500—600 В и определяет границу между нормальным тлеющим разрядом *2* и аномальным *3*.

Нормальный тлеющий разряд характеризуется тем, что поверхность катода, покрытая свечением, пропорциональна току. Другими словами, при увеличении тока плотность его остается постоянной, а следовательно, постоянно и катодное падение. Количество распыляемого в единицу времени материала при этом постоянно и незначительно.

Когда вся поверхность катода оказывается покрытой свечением, с ростом тока увеличиваются плотность тока и катодное падение. В соответствии с повышением плотности бомбардируемых ионов и их энергии возрастает и количество распыляемого материала. Указанные признаки являются характерными для аномального тлеющего разряда, который и используется в технологических целях.

При большой плотности тока имеет место сильный разогрев поверхности катода, автоэлектронная эмиссия уступает место термоэмиссии и возникает дуговой разряд. Для предотвращения перехода тлеющего разряда в дуговой высоковольтный источник должен иметь ограничение по мощности.

С повышением давления газа средняя длина свободного пробега электронов уменьшается, вследствие этого уменьшается и ширина темного катодного пространства. Экспериментально найдено, что между шириной темного катодного пространства D' и давлением газа p существует соотношение (при прочих постоянных условиях):

$$pD' = \text{const}. \qquad (2.31)$$

Соотношение это различно для разных газов и материалов катода.

По мере повышения давления и уменьшения ширины темного катодного пространства движение распыленных частиц все более приобретает хаотический диффузионный

характер из-за столкновения с молекулами и ионами газа. Все большее число распыленных атомов не достигает подложки, а распыляется на стенках камеры или возвращается на катод. Большой вклад в рассеивание атомов вещества дает положительный столб с высокой плотностью ионов и электронов. Несмотря на то, что поверхность катода излучает атомы в соответствии с законом косинуса, поток атомов на поверхность подложки является хаотическим. В этом заключена одна из трудностей использования при катодном распылении накладных масок, дающих размытое изображение элементов.

Таким образом, увеличение давления p и расстояния D от катода до подложки уменьшает количество распыленного материала. Для увеличения скорости распыления и скорости осаждения анод с подложкой можно приблизить к катоду: при этом положительный столб уменьшается (вплоть до исчезновения), а ширина темного катодного пространства остается неизменной. Однако для оптимизации условий распыления целесообразно подобрать величину давления так, чтобы ширина темного катодного пространства была равна расстоянию между катодом и подложкой, т. е. $D'=D$. Это обеспечивает максимальную скорость осаждения вещества на подложку.

Из сказанного следует, что скорость распыления вещества катода, т. е. количество вещества в граммах, распыленного с 1 см^2 в 1 с, определяется для аномального тлеющего разряда следующим выражением:

$$w = K\frac{(U - U_{кр})\,J}{pD}, \qquad (2.32)$$

где U — напряжение анод — катод; $U_{кр}$ — критическое напряжение, ниже которого распыление незначительно; J — плотность тока в разряде; p — давление рабочего газа; D — расстояние катод — подложка; K — постоянная, зависящая от рода газа и материала катода, а также от геометрии системы распыления.

Расстояние катод — подложка нельзя сделать меньше величины темного катодного пространства, иначе разряд погаснет. Это явление используют для защиты отдельных частей катода от распыления. Поскольку все технологические параметры (U, J, p, D) распыления функционально связаны друг с другом, задание одного из них ведет к заданию остальных. Это становится понятным из рассмотрения вольт-амперных характеристик тлеющего разряда

при различных давлениях газовой смеси (Ar+остаточный газ), рис. 2.41. Там же нанесены нагрузочные (выходные) характеристики блока питания. Пересечение нагрузочных характеристик с вольт-амперными характеристиками тлеющего разряда определяет режим распыления.

При распылении сплавов скорость распыления отдельных компонентов в общем случае различна. Если температура катода высока, то диффузия более летучего компонента к поверхности катода может существенно изменить состав конденсирующейся пленки по сравнению с исходным. Во избежание этого явления на практике прибегают к водяному охлаждению катода. Охлаждение катода стабилизирует также тлеющий разряд, предотвращая переход его в дуговой.

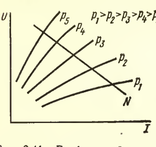


Рис. 2.41. Графический метод определения режимов напыления в тлеющем разряде: U, I — соответственно напряжение и ток аномального тлеющего разряда; p_1, p_2, ..., p_5 — давление газовой смеси; N — нагрузочная характеристика блока питания

Условия конденсации ионно-распыленных атомов. В отличие от термического вакуумного напыления поток атомов вещества на подложку при ионном распылении имеет следующие особенности:

1) энергия и направление удара атома о поверхность подложки носят случайный характер по поверхности и во времени;

2) плотность потока атомов на подложку приблизительно на порядок ниже, что обусловливает более низкие скорости роста пленок (100—1000 Å/мин);

3) средняя энергия атомов, подлетающих к подложке, на 1—2 порядка выше;

4) наряду с нейтральными атомами в потоке присутствуют ионы атомов распыляемого вещества;

5) относительное содержание молекул остаточного газа в потоке и на подложке гораздо выше.

Перечисленные особенности придают специфический характер процессу конденсации при ионном распылении. Важным при этом является наличие на поверхности подложки распределенного отрицательного заряда. Направ-

ляясь к аноду, часть потока электронов остается на поверхности диэлектрической подложки (а затем и пленки), образуя статический заряд, потенциал которого может достигать 100 В и более относительно заземленного анода. Поэтому наблюдаются три явления: поток положительных ионов остаточного газа, загрязняющего пленку; поток ионов рабочего газа, способствующий десорбции газов; поток ионов распыленного материала катода, которые, двигаясь вдоль подложки к «ямам» потенциального рельефа, приводят к быстрому образованию крупных кристаллов.

Последнее явление очень существенно. Во-первых, рост кристаллов преимущественно в плоскости подложки приводит к более раннему образованию сплошной пленки, т. е. к малому значению критической толщины. Во-вторых, наличие зарядового механизма конденсации объясняет отсутствие у ионно-распыленных пленок критического значения температуры подложки и критической плотности пучка.

Образованию крупных кристаллов способствуют также высокие энергии нейтральных атомов распыленного вещества и нагрев подложки из-за бомбардировки. Оба фактора, как было показано в § 2.1, обеспечивают высокую миграционную способность атомов.

При катодном распылении равномерность конденсата по толщине достигается легче, чем при термическом вакуумном испарении, так как плоский источник атомов — катод, может быть по своим размерам больше расстояния до подложки (30—90 мм). Так при диаметре катода 300—350 мм достигается равномерность конденсата по толщине $\pm 2\%$ на площади анода диаметром 150 мм. При планетарном движении подложек на вращающемся аноде равномерность конденсата улучшается до $\pm 1\%$.

Ранее были отмечены некоторые побочные явления, способствующие десорбции остаточных газов из пленки. Однако содержание газов в пленке остается высоким. Например, при парциальном давлении остаточных газов 10^{-6} мм рт. ст. осажденная пленка тантала содержит до 10% (атомных) кислорода. Поэтому необходимы специальные меры для уменьшения загрязнения пленок газами.

Один из приемов уменьшения загрязнения пленки заключается в распылении мишени при синусоидальном

асимметричном напряжении анод — катод (рис. 2.42). В больший по амплитуде полупериод, когда катод имеет отрицательный потенциал, происходит распыление. В следующий за ним полупериод с меньшей амплитудой, когда отрицательным является анод, происходит слабая бомбардировка подложки с пленкой для обезгаживания и очистки пленки.

Другим способом повышения чистоты осаждаемых пленок является использование вспомогательного электрода, имеющего положительный потенциал в несколько

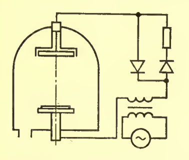


Рис. 2.42. Схема катодного распыления на переменном асимметричном напряжении

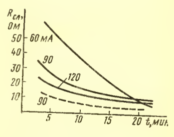


Рис. 2.43. Зависимость удельного поверхностного сопротивления танталовых пленок от тока разряда и времени напыления. (Пунктирная кривая получена при использовании вспомогательного электрода)

десятков вольт относительно анода (см. рис. 2.47). Распыление осуществляется на постоянном токе. Вспомогательный разряд осуществляет слабую бомбардировку поверхности свежеосаждаемой пленки. Хотя скорость осаждения при этом снижается на 10—30%, содержание газов уменьшается в несколько раз. В приведенном примере содержание кислорода в танталовой пленке падает с 10 до 4%.

Рис. 2.43 наглядно иллюстрирует, как снижается удельное сопротивление пленки за счет десорбции газа при использовании вспомогательного разряда. Вспомогательный электрод выполняют либо в виде кольца, либо в виде редкой сетки и располагают на небольшом расстоянии над подложкой.

Ионно-плазменное распыление. При минимально достижимом парциальном давлении остаточных газов в камере распыления чистота ионно-распыленных пленок будет тем выше, чем выше скорость осаждения. Для повышения скорости осаждения необходимо снижать давление рабочего газа p с тем, чтобы свободный пробег распыленных атомов превышал расстояние мишень — подложка. В то же время плотность ионного тока на распыляемую мишень должна оставаться высокой, чтобы плотность атомарного потока была так же высокой.

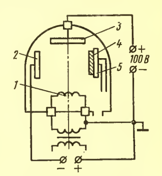


Рис. 2.44. Схема ионно-плазменного распыления (трехэлектродная система):

1 — термокатод; *2* — мишень; *3* — анод; *4* — подложка; *5* — столик

В условиях пониженных (до 10^{-4} мм рт. ст.) давлений рабочего газа высокая плотность тока может быть получена при использовании накального катода, когда газовый разряд возбуждается термоэлектронной эмиссией. Эту разновидность разряда принято называть несамостоятельным газовым разрядом. Для достижения максимально возможной плотности тока в разряде и увеличения концентрации ионов до значения, близкого к 100% (плазменное состояние газа), по оси разряда накладывают продольное магнитное поле (напряженностью 100—300 Э), заставляющее заряженные частицы (ионы и электроны) двигаться по спирали вокруг оси разряда и повышающее степень ионизации до 1 (рис. 2.44).

При наличии накального катода напряжение анод — катод снижается приблизительно до 100 В, а разрядный ток достигает нескольких ампер, что является признаком дугового разряда.

Очевидно, в условиях дугового разряда к материалу накального катода должны быть предъявлены специфические требования, обеспечивающие стабильность и долговечность его работы. Поэтому функции катода и мишени при ионно-плазменном методе распыления должны быть разделены. Мишень из распыляемого материала располагается параллельно плазменному шнуру так, что

ось мишени делит расстояние анод — катод примерно в отношении 1 : 2. В этом месте располагается положительный столб разряда: подавая на мишень достаточно большой отрицательный потенциал, можно оттягивать на нее плотный поток ионов. Распыленные атомы движутся к подложке, расположенной параллельно мишени. В трехэлектродной системе, где электрические цепи разряда и распыления развязаны, обеспечивается большая гибкость управления процессом.

Высокочастотное распыление. В процессе обычного катодного и ионно-плазменного распыления предполага-

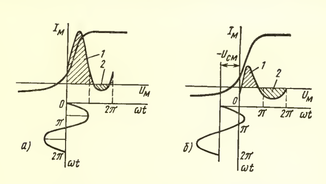


Рис. 2.45. Процесс установления устойчивого режима при высокочастотном распылении:

а — начальный момент: *1* — полный заряд, переносимый электронами, *2* — полный заряд, переносимый положительными ионами, *б* — устойчивый режим работы

ется, что ударяющийся о мишень ион рабочего газа получает с мишени электрон, подтекающий из внешней цепи, и разряжается, превращаясь на некоторое время в нейтральную молекулу, участвующую в хаотическом движении. Если она не будет увеличена откачной системой, то очередное столкновение с заряженной частицей вновь превратит ее в ион, стремящийся к катоду.

Если распыляемый материал мишени высокоомный или диэлектрический, то нейтрализации ионов на мишени не будет и мишень быстро покроется слоем положительных зарядов, уравновешивающих потенциал держателя мишени. Дальнейшее распыление мишени становится невозможным, так как ионы из разряда не будут притягиваться к мишени.

Для возобновления процесса распыления необходимо временно подать на мишень положительный потенциал, чтобы снять заряды с поверхности мишени.

На рис. 2.45, *а* изображена зависимость тока мишени, помещенной в плазму (например, по схеме рис. 2.44), от времени. Ток насыщения электронов значительно превышает ионный благодаря большим подвижностям электронов в плазме. При приложении к диэлектрической мишени постоянного напряжения ток всегда будет равен нулю вследствие зарядки емкости до приложенного напряжения, одной обкладкой которой является металлический держатель мишени, а другой — электроны или ионы, накапливающиеся у мишени.

В первые моменты после приложения напряжения ВЧ на поверхности мишени будет накапливаться большое количество электронов вследствие недостаточной компенсации их заряда положительными зарядами ионов.

Это приведет к накапливанию отрицательного пространственного заряда вокруг мишени, которое равносильно приложению отрицательного смещающего напряжения — $U_{см}$ (рис. 2.45, *б*). Причем величина $U_{см}$ автоматически устанавливается такой, что количество положительных ионов, попадающих на мишень за время отрицательной полуволны напряжения ВЧ, равно количеству электронов за время положительной полуволны. В этом случае за период происходит компенсация положительных и отрицательных зарядов. Режим работы становится устойчивым. Оптимальная частота изменения потенциала на мишени, обеспечивающая наивысшую скорость распыления, находится в диапазоне 10—20 МГц, а метод называют высокочастотным распылением.

Высокочастотное распыление удобнее выполнять по трехэлектродной схеме, так как в двухэлектродной схеме в полупериод положительного потенциала на катоде имеет место распыление анода и пленки на подложке.

Используя универсальность ВЧ-распыления, можно применить групповую мишень. Последовательное выведение мишеней на позицию распыления позволяет напылять многослойные пленки.

Высокочастотное ионно-плазменное распыление представляет собой также универсальное средство для вы-

полнения *ионного травления*. Сущность ионного травления заключается в том, что сплошную пленку на подложке защищают фотомаской (задубленный фоторезист), после чего подложку помещают в камеру ВЧ-распыления в качестве мишени. Поскольку бомбардирующие ионы при низком давлении летят на подложку перпендикулярно поверхности, удаление незащищенных фоторезистом участков пленки происходит без подтравливания, которое характерно для химического растворения.

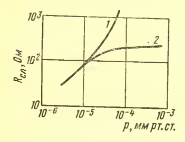


Рис. 2.46. Зависимость удельного поверхностного сопротивления $R_{сл}$ от парциального давления реактивного газа: 1 — распыление Та в среде O_2; 2 — распыление Та в среде N_2

Стойкость полимеризованной маски обеспечивается за счет более низкого коэффициента распыления, а также за счет большой толщины по сравнению с толщиной распыляемой пленки.

Реактивное катодное распыление. Наличие в камере катодного распыления активных газов до сих пор рассматривалось как нежелательное. Однако если в камеру распыления кроме рабочего газа сознательно вводить в достаточном количестве активный газ, то на подложке получается пленка, представляющая собой химическое соединение газа с распыляемым металлом. Свойства этой пленки зависят от рода и парциального давления активного газа.

Осуществляя непрерывную подачу в камеру распыления одного из активных газов (азот, кислород, окись углерода, метан, сернистый ангидрид), можно в зависимости от парциального давления получать либо твердые растворы металла с соответствующим элементом, либо химические соединения (нитриды, окислы, карбиды, сульфиды и т. д.). Соответственно свойства пленки можно менять в широких пределах от чисто проводящих до чисто диэлектрических.

В общем случае процесс осаждения пленки химического соединения обусловлен тремя механизмами, действующими параллельно:

1) образование химического соединения на поверхности мишени и его распыление;

2) образование химического соединения в пролетном пространстве и осаждение его на подложку;

3) взаимодействие осажденной на подложку пленки металла с активным газом.

На рис. 2.46 показана зависимость удельного поверхностного сопротивления пленки при распылении тантала от парциального давления активного газа. Для резисторов целесообразно принимать значения $R_{сл}$, соответствующие пологому участку кривой, что обеспечивает лучшую воспроизводимость свойств пленки и снижает требования к точности дозирования активного газа.

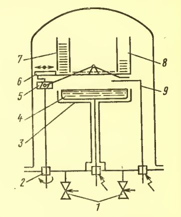


Рис. 2.47. Схема подколпачного устройства установки УВН-62П-1:

1 — диафрагменные натекатели газа с электромагнитным управлением; *2* — привод движения подложек; *3* — экран; *4* — водоохлаждаемый катод; *5* — механизм подъема подложек; *6* — механизм перемещения подложек; *7* — загрузочный бункер с подложками; *8* — приемная кассета с подложками; *9* — вспомогательный электрод

Для реактивного катодного распыления пригодны схемы, в которых используется холодный катод-мишень, так как накальному катоду при наличии активных газов присущи нестабильность эмиссионных свойств и низкая стойкость.

Применение реактивного катодного распыления облегчает задачу автоматизации процесса при получении многослойных сплошных пленок. Переход от одного типа пленки к другому связан лишь со сменой реактивного газа. В частности пассивная часть гибридной пленочной микросхемы, содержащая лишь резисторы, может быть получена с помощью реактивного катодного распыления в виде двухслойной системы «резистивный слой — проводящий слой» и последующей двухэтапной фотолитографии.

Оборудование для распыления ионной бомбардировкой. На рис. 2.47 представлена схема подколпачного устройства установки УВН-62П-1, предназначенной для промышленного получения танталовых пленок методом катодного распыления (по двухэлектродной схеме).

Устройство содержит транспортно-бункерную систему конвейерного типа. Горизонтальные направляющие для подложек и загрузочно-разгрузочное устройство являются анодом. На расстоянии 40—60 мм под анодом размещен плоский водоохлаждаемый танталовый катод, на который подается высокое отрицательное напряжение. С целью локализации тлеющего разряда нижняя и боковые части катода, а также токоподвод защищены экраном.

С помощью механизма перемещения подложки из загрузочного бункера по одной попадают на горизонтальные направляющие, перемещаются по ним над катодом и затем подаются механизмом подъема в приемную кассету. В процессе транспортировки на подложке осаждается тантал. Одновременно по направляющим размещаются шесть подложек. Толщина напыляемого слоя зависит от интенсивности процесса распыления и времени прохождения подложкой рабочей зоны. Последнее определяется тактом работы транспортного устройства (от 10 с до 4 мин), который задается реле времени.

Для улучшения качества наносимой пленки используется вспомогательный электрод, на который может подаваться положительное (относительно анода) напряжение до 300 В.

Основные технические характеристики установки УВН-62П-1

Предельный вакуум в рабочей камере	$5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
Время достижения предельного вакуума при разогретом паромасляном насосе	90 мин
Быстрота откачки:	
бустерного насоса БН-3 . .	500 л/с
низковакуумного насоса ВНМ-18Г	18 л/с
Размеры рабочей камеры . .	Ø 500×640 мм
Максимальная температура нагрева рабочей камеры . . .	90° С
Питание вспомогательного электрода:	
ток	300 мА
напряжение	0,3 кВ
Питание системы катодного распыления:	
ток	500 мА
напряжение	5 кВ
Количество одновременно загружаемых подложек	200 шт.

Размеры подложки	60×48×0,6 мм или ∅ 25—40 мм толщииой 0,15—0,8 мм
Питание установки от трехфазиой четырехпроводиой сети перемеииого тока (с иулевым проводом):	
напряжение	380/220 В
частота	50 Гц
Максимальная потребляемая мощиость	20 кВт
Расход холодиой воды от магистрали давлеиием 2—4 ат	400 л/ч
Расход горячей воды от магистрали давлеиием 2—4 ат . .	200 л/ч
Габариты установки:	
с опущенным колпаком . .	1550×1550×1800 мм
с подиятым колпаком . .	1550×1550×2450 мм
Масса	900 кг

Распыление по трехэлектродной схеме (ионно-плазменное распыление) может быть выполнено на установке ИОН-1В, схема подколпачного устройства которой представлена на рис. 2.48.

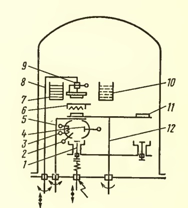


Рис. 2.48. Схема подколпачиого устройства устаиовки ИОН-1В:

1 — мншень; *2* — поджнгающнй электрод; *3* — накальный катод; *4* — анод; *5* — заслонка; *6* — нагреватель подложек; *7* — загрузочный бункер; *8* — маннпулятор; *9* — вспомогательный электрод; *10* — прнемный бункер; *11* — маскодержатель; *12* — карусель масок н мншеней

Подложки, закрепленные на подложкодержателях, укладывают в загрузочный бункер. Механический манипулятор перемещает их из бункера по одной на рабочую позицию, где они совмещаются с масками. После осаждения пленки манипулятор переносит подложку в приемный бункер. Шестипозиционная двухъярусная карусель масок и мишеней позволяет наносить на подложку

последовательно необходимые топологические слои микросхемы.

После обезгаживания системы и получения предельного вакуума через игольчатые натекатели подается очищенный рабочий газ. При заданном и равновесном давлении зажигают дуговой разряд. Поджигающий электрод облегчает эту задачу.

Вспомогательный электрод служит для ионной очистки поверхности подложки в тлеющем разряде, а также для ионного травления (при постоянном или ВЧ-напряжении). Механическая заслонка позволяет осуществлять предварительную очистку мишени без загрязнения подложки.

Основные технические характеристики установки ИОН-1В

Предельный вакуум в рабочей камере	$5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
Время достижения предельного вакуума при разогретом паромасляном насосе . . .	45 мин
Быстрота откачки:	
бустерного насоса БН-3 . .	500 л/с
низковакуумного насоса ВН-7Г	7 л/с
Размеры рабочей камеры	Ø 600×700 мм
Максимальная температура нагрева рабочей камеры . . .	90° С
Питание системы ионного распыления:	
ток дуги	до 15 А
ток мишени	до 400 мА
рабочее напряжение	10 кВ
Количество одновременно загружаемых подложек . . .	6 шт.
Размеры подложки	60×48×0,6 мм
Допустимая температура нагрева подложек	400° С
Количество масок	6 шт.
Точность совмещения подложки с маской при температуре 300° С	100 мкм
Контроль толщины наносимого слоя	по прибору КИТ-1П
Питание установки от трехфазной четырехпроводной сети переменного тока (с нулевым проводом):	
напряжение	380/220 В
частота	50 Гц
Максимальная потребляемая мощность	20 кВт

Расход холодной воды от магистрали давлением 2—4 ат	400 л/с
Расход горячей воды от магистрали давлением 2—4 ат . .	200 л/ч
Габариты установки:	
с опущенным колпаком . .	2540×1100×2100 мм
с поднятым колпаком . . .	2540×1100×2800 мм
Масса	2500 кг

§ 2.9. Технологические особенности толстопленочных микросхем

Общая характеристика толстопленочных микросхем. В качестве подложек толстопленочных микросхем применяют термостойкую и высокотеплопроводную керамику (например, алундовую марки 22ХС, содержащую 96% Al_2O_3), что дает возможность использовать высокопроизводительный и экономичный процесс — нанесение элементов на основе паст через сетчатый трафарет с последующим вжиганием в керамику.

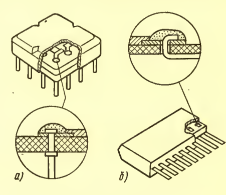


Рис. 2.49. Конструктивно-технологические варианты толстопленочных микросхем:

а — в металлополимерном корпусе с круглыми выводами; *б* — в полимерном корпусе с плоскими выводами

Высокая нагревостойкость и механическая прочность контактных площадок позволяет осуществлять непосредственное соединение внешних выводов путем развальцовки (рис. 2.49, *а*) или гибки (рис. 2.49, *б*), а также лужение контактных площадок методом погружения. Последнее повышает надежность соединения выводов и облегчает монтаж дискретных элементов.

После контроля на функционирование микросхему устанавливают в дюралевый корпус и заливают эпоксидным компаундом (рис. 2.49, *а*) или непосредственно опрессовывают в пресс-форме (рис. 2.49, *б*).

Основные преимущества толстопленочных микросхем по сравнению с тонкопленочными следующие:

1) низкая стоимость, сравнимая со стоимостью печатных схем;

2) малое время подготовки производства, что допускает возможность организации мелкосерийного производства;

3) возможность получения резисторов с удельным поверхностным сопротивлением до 1 МОм на квадрат и удельной мощностью рассеяния до 4 Вт/см²;

4) монтаж дискретных элементов и герметизация более просты.

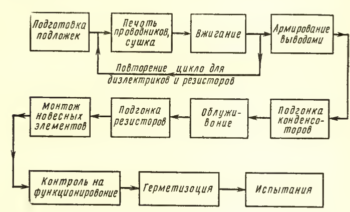


Рис. 2.50. Укрупненная схема техпроцесса изготовления толстопленочных микросхем

В то же время толстопленочной технологии присущи следующие недостатки:

1) более высокая стоимость подложек;

2) значительный разброс сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов, обусловленный упрощенным методом нанесения элементов и сложностью учета восстановительно-окислительных процессов при вжигании пасты, что вынуждает вводить в техпроцесс дополнительную операцию подгонки пассивных элементов;

3) пониженная стабильность резисторов (временная и температурная) и худшие шумовые характеристики по сравнению с тонкопленочными;

4) отсутствие перспективы создания толстопленочных активных элементов.

На рис. 2.50 представлена укрупненная схема техпроцесса изготовления толстопленочных микросхем.

Подложки. Для изготовления подложек используют, как правило, керамику 22ХС, основу которой составляет окись алюминия с добавками марганца и окиси кремния (для обеспечения оптимальных размеров кристаллов), а также окиси хрома (для повышения прочности). Все исходные компоненты перемешивают на валковой мельнице (24 ч), а затем промывают кислотой (для растворения следов материала валков) и в дистиллированной воде. Далее следует сушка и прокаливание при температуре 600° С в течение 4 ч.

Заготовки подложек получают путем литья под давлением (в качестве связки используют парафин с воском). Предварительный обжиг для удаления связки и частичного спекания производят при 1300° С, окончательный — при 1600° С.

К геометрии и микрогеометрии подложек предъявляются специфические требования, обусловленные необходимостью получения воспроизводимых по толщине печатных слоев, прочно сцепляющихся с основанием:

1) допустимые отклонения по толщине подложки не должны превышать $\pm 0{,}5\%$;

2) величина прогиба не должна превышать 4 мкм/мм;

3) оптимальная величина средней высоты микронеровностей должна лежать в пределах 20—40 мкм (8—9-й класс чистоты).

Усадка и коробление, сопровождающие обжиг заготовок, обусловливают дополнительную механическую обработку (шлифование) поверхности подложек. Для уменьшения коробления подложки толстопленочных схем выполняют либо квадратной формы, либо прямоугольной с небольшим отношением длины к ширине. Выпускаемые серийно толстопленочные микросхемы имеют размеры подложек 11×11 и 16×20 мм. Групповые керамические подложки не применяют из-за сложности их разрезки.

Подготовка подложек к нанесению паст включает промывку в теплой мыльной воде, затем в проточной дистиллированной. Промытые и высушенные подложки подвергаются обжигу в конвейерной печи при температуре 600° С.

Нанесение элементов методом сеткографической печати. Проводящие и резистивные пасты представляют собой смеси мелкодисперсных порошков благородных

металлов (Ag, Pd, Au, Pt), окислов металлов и стекла, взвешенных в органической связке (например, скипидарно-канифолевой) до вязкости 2000 Пз. В зависимости от соотношения исходных компонентов и характера рабочей среды при вжигании можно получить слои с удельным сопротивлением от 0,02—0,1 Ом (для проводников и контактов) до 10 Ом — 1 МОм (для резисторов) на квадрат. Толщина проводящих и резистивных слоев в отожженном состоянии находится в пределах от 15 до 25 мкм.

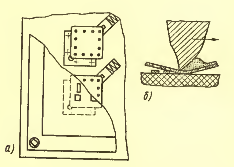


Рис. 2.51. Элементы приспособления для сеткографической печати:

а — схема базирования подложек относительно трафарета; *б* — взаимное расположение ракеля и трафарета при печати

Для получения диэлектрической пленки без микроотверстий рекомендуется двухкратная печать с промежуточной сушкой. В результате толщина диэлектрического слоя в отожженном состоянии может достигать 40 мкм. Для получения при этом приемлемой удельной емкости (40 000 пФ/см²) в состав диэлектрической пасты помимо стекла вводят окись титана, титанат бария и другие сегнетоэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (400—800).

Метод сеткографии хорошо освоен в практике производства печатных плат для нанесения защитной маски. При использовании его для нанесения элементов толстопленочных микросхем к нему предъявляют следующие дополнительные требования:

1) точное базирование подложек относительно сетчатого трафарета, что в условиях многослойной печати

обеспечивает точность относительного расположения элементов рисунка различных слоев;

2) оптимальное взаимное расположение подложки, трафарета и ракеля, обеспечивающее определенную и воспроизводимую толщину наносимого на подложку слоя.

Приспособление для сеткографической печати (рис. 2.51) включает в себя систему вакуумного прижима для ориентации подложек по базовым граням и пружинный прижим для окончательной фиксации. Ориентацию рабочего поля трафарета относительно гнезд под подложки осуществляют с помощью точных базовых отверстий на рамке трафарета.

Трафарет выполняют на основе сетки из нержавеющей стали или капрона с размерами ячеек от 0,08 до 0,025 мм, что позволяет получать хорошо воспроизводимую ширину линий до 0,15 мм *. Сетку туго натягивают на рамку из литейного алюминиевого сплава. Материал ракеля должен быть износоустойчив и устойчив к органическим растворителям. Широко используют полиуретан и фторкаучук. Угол ракеля при вершине 90 или 60°. Давление ракеля порядка 10—15 кГ на миллиметр длины лезвия.

В зависимости от габаритов трафарета зазор между сеткой и подложкой выбирают в пределах 0,25—1,5 мм (меньшие значения — для малогабаритных трафаретов). Слишком малый зазор не обеспечивает должного пружинения сетки, что приводит к нечеткому рисунку. Скорость движения ракеля устанавливают в пределах от 50 до 250 мм/с.

Для воспроизводимости результатов печати в пределах рабочего поля трафарета (что особенно важно в случае применения многоместных приспособлений) последний должен иметь достаточно широкие нерабочие поля по периферии сетки.

Сушку полученных отпечатков производят при температуре 80—125° С в течение 15 мин. Основное условие — постепенное удаление органического растворителя во избежание образования пустот и раковин. Наилучшее качество обеспечивает инфракрасная сушка.

---

* Если необходима ширина линий до 0,05 мм, вместо сетчатого трафарета применяют металлические фольговые маски, полученные путем фотолитографии.

Вжигание элементов. Печатание каждого последующего слоя должно, как правило, выполняться только после сушки и вжигания предыдущего. Таким образом, процесс формирования толстопленочных элементов состоит из ряда последовательных циклов печать — сушка — вжигание, очередность которых определяется двумя факторами:

1) максимальной температурой вжигания данного слоя. Каждый последующий слой должен вжигаться при более низкой температуре, чем предыдущий;

2) «чувствительностью» данного слоя к повторным нагревам.

Процесс вжигания длится около 1,5 ч, а температура вжигания зависит от состава паст (для проводниковых порядка 800° С, для диэлектрических — 700° С, для резистивных — 650° С).

С учетом сказанного рекомендуется следующая рациональная последовательность процесса:

1) печать, сушка и вжигание проводников и нижних обкладок конденсаторов;

2) печать и сушка диэлектриков (один или два слоя);

3) печать и сушка верхних обкладок конденсаторов;

4) совместное вжигание диэлектриков и верхних обкладок (для уменьшения диффузии металлов в диэлектрик);

5) печать, сушка и вжигание резисторов.

Данная последовательность сохраняется и в случае размещения элементов по обоим сторонам подложки. Для каждого слоя на каждой из двух сторон выполняют отдельный цикл.

Восходящую ветвь температурного цикла вжигания можно условно разделить на три этапа (по мере повышения температуры):

1) разложение и удаление нелетучих компонентов органической связки.

На этом этапе необходимо обеспечить невысокую скорость подъема температуры и принудительную вытяжную вентиляцию (для ослабления окислительно-восстановительных процессов, протекающих за счет выделения кислорода и водорода при разложении связки);

2) расплавление стеклянной связки (фритты), смачивающей керамическую подложку и связывающей частицы металла;

3) физико-химическое взаимодействие стеклянной фритты с поверхностным слоем керамики, обеспечивающее адгезию.

Отработанный экспериментально температурный режим должен воспроизводиться от партии к партии с высокой точностью. Так скорость изменения температуры должна выдерживаться с точностью ± 2 град/мин (при скоростях 30—70 град/мин), максимальная температура — с точностью $\pm 1^\circ$ С (в диапазоне 750—1000° С).

Вжигание можно выполнять в камерных печах периодического действия (с программным управлением) или в туннельных печах непрерывного действия. Последние эффективны в крупносерийном и массовом производстве.

Подгонка резисторов и конденсаторов. При использовании дешевого и высокопроизводительного метода сеткографической печати и трудноуправляемого процесса вжигания получают значительный разброс параметров пассивных элементов. Для толстопленочных резисторов, например, он составляет порядка $\pm 30\%$ от номинального значения сопротивления. В таких условиях процент выхода годных плат оказывается весьма низким. Проиллюстрируем это следующим примером.

Пусть плата микросхемы должна содержать 12 резисторов с допустимыми отклонениями от номинала $\pm 10\%$. Считая, что центр группирования кривой распределения сопротивлений совпадает с номинальным значением, и принимая нормальный закон распределения, нетрудно подсчитать, что вероятность выхода годного резистора $P_г = 0{,}68$, а вероятность выхода годной платы $P_г^{12} = 0{,}01$. При отклонениях $\pm 20\%$ соответствующие вероятности имеют значения 0,955 и 0,5754.

Первый возможный путь решения проблемы — запуск в производство бо́льшего количества плат, чем предусмотрено программой (в первом случае в 100 раз, во втором — примерно в 2 раза), и последующая отбраковка негодных. Трудоемкость изготовления одной годной платы возрастает при этом в 100 и 2 раза соответственно.

Второй путь заключается в подгонке сопротивления резисторов до значений, укладывающихся в заданный допуск. Если в качестве критерия оптимальности выбрать минимальную трудоемкость одной платы с готовыми пассивными элементами, то подгонка окажется целесообразной в том случае, если трудоемкость платы с

учетом подгонки окажется меньше трудоемкости платы с учетом отбраковки:

$$\frac{T}{P_{\text{г}}^{N}} > Nt_{\text{п}} + T, \tag{2.33}$$

где T — номинальная трудоемкость платы; $t_{\text{п}}$ — среднее время подгонки одного элемента; N — число элементов на плате.

Из известных методов подгонки элементов (механический, термический, химический и др.) в производстве нашел применение метод локального испарения материала элемента с помощью лазерного луча. Данный метод не связан с загрязнениями и структурными изменениями элементов микросхемы и обладает высокой производительностью. Среднее время подгонки резистора составляет 6 с, что при номинальной трудоемкости одной платы порядка 20 мин делает его экономически целесообразным даже при больших допустимых отклонениях ($\pm 20\%$) и малом числе элементов на плате (4—6) *.

Подгонка резисторов заключается в дискретном удалении части материала вдоль кромки резистора, что ведет к возрастанию сопротивления. При подгонке конденсаторов удаляется участок верхней обкладки, в результате чего емкость конденсатора уменьшается. Отсюда следует, что для исключения неисправимого брака, резисторы должны проектироваться с заведомо заниженными значениями сопротивления, а конденсаторы — с завышенными значениями емкости (рис. 2.52).

Для подгонки резисторов используют импульсы лазерного излучения с удельной мощностью 10^6—10^8 Вт/см² и длительностью порядка 1 мс. При оптимально выбранной плотности энергии, позволяющей удалить материал пленки на всю глубину, не затрагивая основы, размер удаляемого пятна зависит от длительности импульса. Размер пятна (количество удаляемого материала за один импульс), а следовательно, и изменение сопротивления ΔR за один импульс выбирают исходя из заданного допуска δ_R:

$$\Delta R \leqslant \delta_R.$$

* Следует, однако, помнить, что с уменьшением допуска время на подгонку одного элемента возрастает.

При $\Delta R = \delta_R$ количество импульсов, необходимое для подгонки резистора, будет минимальным.

Подгонка конденсаторов требует более тщательного подбора режимов обработки в виду опасности короткого замыкания обкладок.

Лазерная установка СУ-1 (на рубине) позволяет работать со скоростью 30—40 импульсов в минуту. В последнее время импульсные лазеры вытесняются в производстве более производительными газовыми лазерами непрерывного излучения (на аргоне, углекислом газе и др.).

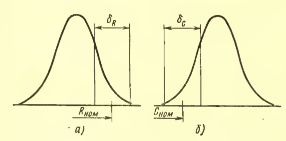


Рис. 2.52. Относительное расположение поля рассеивания и поля допуска до подгонки:
а — для толстопленочных резисторов; *б* — для толстопленочных конденсаторов

В процессе подгонки выводы подложки устанавливают в разъем, связывающий элементы схемы с измерительным прибором. С помощью переключателя на приборном пульте в схему измерения поочередно включается каждый элемент схемы. Для этого каждый элемент схемы должен иметь индивидуальный выход на выводы подложки. Это достигается либо с помощью временных (технологических) перемычек, подпаиваемых к контактным площадкам (рис. 2.53, *а*), либо с помощью временных армированных выводов, которые отрезаются после подгонки (рис. 2. 53, *б*).

Многослойные толстопленочные коммутационные платы. Многослойные коммутационные платы с толстопленочными проводниками, используемые в микросборках, позволяют достичь высокой плотности монтажа многовыводных интегральных схем на общей подложке.

Многослойная плата представляет собой пакет листовых керамических заготовок, на которых имеется ри-

сунок толстопленочных межсоединений. Электрическая связь отдельных слоев соединений осуществляется через контактные переходы — металлизированные отверстия.

Отдельные керамические листовые заготовки толщиной не менее 100 мкм получают путем шликерного литья. После сушки для удаления летучих компонентов связующего производится пробивка отверстий, а затем трафаретная печать проводников с использованием металлических паст. При этом происходит заполнение металлом и контактных переходов. Отдельные листовые заготовки укладывают в пакет (3—5 слоев) при точном совмещении рисунков и спрессовывают. Далее пакет подвергают высокотемпературной обработке с целью формирования необходимых свойств керамики (спекание) и вжигания металлической пасты в керамику. На начальном этапе термообработки скорость повышения температуры должна быть невысокой для медленного удаления органической связки из системы «металл — керамика».

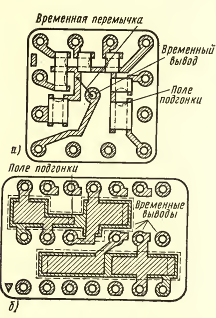


Рис. 2.53. Платы с толстопленочными резисторами (*а*) и конденсаторами (*б*)

Таким образом, главная особенность данного процесса заключается в необходимости высокотемпературной обработки системы «металл — керамика» (1450—1650° С) и одновременного удаления органической связки из металлической пасты и керамики. Поэтому высокое качество и надежность многослойных соединений связаны с обеспечением термохимической и физической

совместимости металлического и керамического материалов.

Использование традиционных для толстопленочной технологии металлов (серебро, золото, палладий, медь) в качестве проводников в данном случае затруднено, так как при совместном обжиге с керамикой давление паров этих металлов оказывается очень большим. В связи с этим широко применяют тугоплавкие металлы молибден и вольфрам, хотя их удельное объемное сопротивление (5,7 и 5,5 мкОм · см) существенно превышает сопротивление серебра (1,6 мкОм · см). Таким образом, обеспечивается термическая совместимость металла с керамикой.

Под химической совместимостью понимают совместимость металла, керамики и окружающей среды в процессе спекания. Выбранные материалы практически не должны реагировать с окружающей средой во всем интервале температур спекания, т. е. изменения свойств материалов в результате окислительно-восстановительных процессов должны быть минимальны. С этой целью отыскивают такие условия процесса, при которых указанные реакции были бы равновесными.

В понятие «физическая совместимость» металла и керамики вкладывают согласование усадки и температурных коэффициентов расширения с целью исключения раковин, трещин, остаточных напряжений и, как следствие этого, потери металлокерамической адгезии. Согласование усадки может быть достигнуто как путем изменения содержания органической связки в керамике и металлической пасте, так и путем изменения гранулометрического распределения (распределения частиц по размерам) этих материалов.

Наибольшее распространение для изготовления многослойных коммутационных плат находят керамики на основе Al_2O_3 и BeO.

Глава третья
СБОРКА МИКРОСХЕМ

§ 3.1. Операции, предшествующие сборке

Электрический контроль микросхем целесообразно выполнять до разделения пластины на отдельные кристаллы и установки их в корпус, так как в этом случае

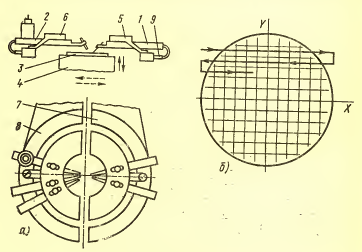


Рис. 3.1. Схема конструкции зондовой установки:
а — схема расположения головок относительно пластины; *б* — порядок обхода микросхем

операцию контроля проще автоматизировать. Автоматический зондовый контроль микросхем в групповой пластине осуществляют путем автоматической перестановки на определенный шаг относительно подложки

группы заранее настроенных зондов (контактных щупов), контактирования их с контактами микросхемы, расположенными по периферии кристалла, автоматической маркировки негодных микросхем по сигналу с контрольной аппаратуры.

Схема расположения зондовой *1* и маркировочной *2* головок относительно контролируемой пластины *3* представлена на рис. 3.1, *а*. Контролируемую пластину крепят на предметном столике *4* с помощью вакуумного присоса. Предметный столик по командам с контрольной аппаратуры перемещается на установленный шаг по оси X, а после обработки строки — по оси Y для перехода на следующую строку (см. рис. 3.1, *б*). Перед началом очередного перемещения на шаг предметный столик опускается, отводя пластину от зондов, а по завершении перемещения вновь поднимается, обеспечивая контакт зондов со следующей микросхемой. Зондовые и маркировочные головки крепят на пластинах *5* и *6* винтами. Пластины в свою очередь закреплены на кронштейнах *7* и *8*, внутри которых размещен жгут соединительных проводов. Головки с помощью штекеров *9* через гнезда на кронштейнах подключают к контрольной аппаратуре.

Перед началом работы пластину с микросхемами ориентируют путем перекрестия микроскопа по направлениям перемещения столика X и Y. Далее каждая головка индивидуально регулируется так, чтобы вершина зонда приходилась на центр соответствующей контактной площадки микросхемы. Шаг перемещения по осям X и Y устанавливается переключателем на пульте.

Схема конструкции зондовой головки представлена на рис. 3.2. Головку двумя винтами ориентировочно устанавливают и крепят в пластине кронштейна, имеющей паз под винты (на рис. пластина изображена пунктиром). Вольфрамовый зонд *1* установлен в отверстие разрезного держателя *2* и защемлен в нем с помощью винта *3*. Держатель жестко связан с изоляционной планкой *4*, вдоль нижней плоскости которой находятся два параллельных печатных проводника: один соединяет держатель зонда с одним из штекеров *5*, другой через контакт *6* связывает второй штекер головки с ее корпусом. Система «изоляционная планка — держатель зонда» связана с корпусом с помощью плоской пружины *7*. В процессе контактирования зонда контакт *6* разомкнут (предметный столик с пластиной поджимает зонд кверху). В случае отсутствия

механического контакта с пластиной одного или нескольких зондов (окончание строки) или всех зондов (предметный столик опущен) замыкание контактов *6* в головках приводит к формированию соответствующих команд: в первом случае — подачи на шаг в направлении *Y*, во втором — перемещения на шаг в направлении *X*.

При касании всех зондов с контролируемой пластиной (предметный столик поднят) контакты *6* всех зондовых головок размыкаются, формируя сигнал для начала контроля.

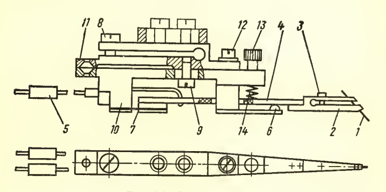


Рис. 3.2. Схема конструкции зондовой головки

Точная регулировка положения зонда по вертикали осуществляется винтом *8*, а в горизонтальной плоскости смещением планки *10* относительно планки *11* в продольном и круговом (относительно винта-оси *9*) направлениях. После регулировки положение подвижной части головки фиксируется винтом *12*. Точная регулировка давления зонда на пластину осуществляется винтом *13* через пружину *14*.

Схема конструкции маркировочной головки показана на рис. 3.3. Головка несет на себе баллончик *1*, заполненный на $^2/_3$ высоты маркировочной краской. Баллончик в нижней части заканчивается капилляром, который располагается с некоторым зазором в центре контролируемой микросхемы. Если по результатам контроля микросхема оказывается бракованной, вырабатывается сигнал, поступающий в электромагнит *2*. В результате взаимодействия штока *3* электромагнита и рычагов *4* и *5* толкатель *6* выталкивает на кристалл миниатюрную каплю краски. По окончании импульса толкатель *6* воз-

вращается в исходное положение пружиной *7*. Исходное положение толкателя устанавливается винтом *8*.

Крепление маркировочной головки и регулировка ее положения относительно пластины выполняются так же, как и зондовой.

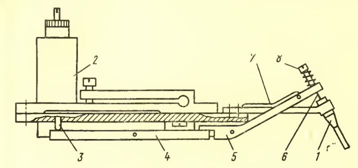


Рис. 3.3. Схема конструкции маркировочной головки

После разделения пластины на отдельные кристаллы бракованные микросхемы с цветной меткой отсортировываются и на сборку не поступают.

Основные технические характеристики зондовой установки ЭМ-627

Количество зондовых головок	40 шт.
Количество маркировочных головок	4 шт.
Давление зондов на пластину	5—15 г
Диаметр предметного столика	86 мм
Максимальное перемещение предметного столика по координатам X и Y	80 мм
Шаг перемещений столика по координатам X и Y (плавно регулируемый)	0,5—11 мм 1—22 мм
Накопленная ошибка шага столика	±0,01 мм
Кинематическая производительность:	
при шаге 0,5—1	9700 циклов/ч
при шаге 20—22 мм	1200 циклов/ч
Габариты установки	680×660×610 мм
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 300 Вт
Вакуум	260 мм рт. ст.
Масса	95 кг

Прибор ЭМ-630, предназначенный в совокупности с зондовой установкой ЭМ-627 для контроля статических параметров интегральных схем, может формировать 79 различных контрольных тестов. Длительность контрольного теста 10 мс. Диапазон граничных уровней контролируемых напряжений 0,05—9,99 В, погрешность контроля $\pm(1,5\% + 0,5$ мВ$)$. Диапазон граничных уровней контролируемых токов 10^{-7}—0,0999 А, погрешность контроля $\pm(2\% + 10$ нА$)$. Число одновременно коммутируемых выводов интегральной схемы равно 24.

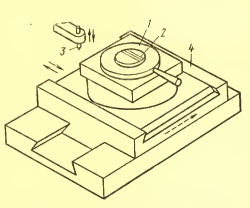


Рис. 3.4. Схема процесса скрайбирования

Разделение пластины на отдельные кристаллы осуществляют путем *скрайбирования* и последующей *ломки* пластины.

Сущность скрайбирования заключается в нанесении на поверхность пластины со стороны структур алмазным резцом рисок. Риски наносят в двух взаимно перпендикулярных направлениях по границам микросхем шириной 20—40 мкм и глубиной 10—15 мкм.

Кинематическая схема установки для скрайбирования напоминает схему продольно-строгального станка. Столик *1* (рис. 3.4) с пластиной *2* совершает возвратно-поступательные движения относительно резца *3*. При прямом ходе резец наносит риску по всей длине пластины. При обратном ходе резец приподнимается, пропуская столик с пластиной, а стол *4* совершает поперечную подачу на шаг. После нанесения всех рисок в одном на-

правлении столик с пластиной поворачивают на 90° и наносят систему поперечных рисок. В процессе обработки пластину крепят к столику с помощью вакуумного присоса.

Перед началом работы с помощью микроскопа МБС положение пластины регулируют таким образом, чтобы визирная линия микроскопа совпадала с границей между кристаллами по всей длине пластины. Положение визирной линии совпадает с направлением продольного перемещения столика. Устанавливают также нужный шаг поперечной подачи стола и величину нагрузки на резец. При скрайбировании кремниевых пластин нагрузка составляет 40—60 г при толщине пластины 200 мкм и 80—120 г при толщине 300—400 мкм.

В качестве режущего инструмента используют резцы из натурального или синтетического алмаза, выполненные в виде трехгранной или четырехгранной пирамиды (рис. 3.5). Режущими элементами таких резцов являются ребра пирамиды, которые используются последовательно. Средняя стойкость режущего ребра (износ не более 10—15 мкм) составляет 50—80 пластин диаметром 40 мм, т. е. примерно 3500 резов. Наличие на пластине окиси кремния или стекла резко увеличивает износ резца. Поэтому на пластинах по границам микросхем целесообразно предусматривать зону без покрытия шириной 50—75 мкм. Стравливание окиси кремния с этих участков можно совместить с операцией травления окон под металлические контакты.

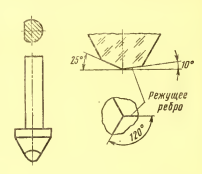


Рис. 3.5. Алмазный резец для скрайбирования

Для скрайбирования ситалловых подложек можно использовать стеклорезы — резцы для резки листового стекла, режущая часть которых выполнена по форме четырехгранной усеченной пирамиды. Нагрузка на резец устанавливается в пределах 150—250 г.

В табл. 3.1 приводятся технические характеристики установки скрайбирования ЭМ-203.

Таблица 3.1

Технические характеристики установки скрайбирования ЭМ-203

Шаг сменного ходового винта, мм	Диапазон шагов, мм	Дискретность, мм	Скорость перемещения на шаг, мм/с	Точность шага, мм	Накопленная погрешность шага на длине 60 мм, мм
1,2	0,01—9,99	0,01	4	±0,005	0,010
2,4	0,01—9,99	0,01	8	±0,008	0,012
4,8	0,02—19,98	0,02	16	±0,015	0,020

Длина хода подачи на шаг . .	75 мм
Величина рабочего хода	38—80 мм
Число двойных ходов в минуту	15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60
Диаметр рабочей поверхности вакуумного присоса	72 мм
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 200 Вт
Разрежение вакуумной сети . .	150—180 мм рт. ст.
Габариты:	
скрайбера	500×568×480 мм
шкафа электрооборудования	128×260×368 мм
Масса	102 кг

К основным преимуществам метода механического скрайбирования следует отнести:

а) отсутствие пропила в пластине и малую ширину риски, что обеспечивает экономию полупроводникового материала и позволяет эффективно использовать площадь пластины;

б) высокую производительность — до 10 пластин в час;

в) возможность быстрой переналадки установки с одного размера кристалла на другой.

Основными недостатками метода являются:

а) невысокая точность геометрических размеров кристаллов после ломки, обусловленная анизотропностью механических свойств полупроводников пластины (плоскость скола кристалла располагается под углом к исходной плоскости пластины);

б) зависимость качества ломки от соотношения ширины кристалла к его толщине.

Последнее приобретает особое значение в связи с тенденцией увеличения диаметра пластин и связанным с

этим увеличением их толщины. Увеличение толщины пластин при неизменной глубине рисок приводит к повышенному браку на операции ломки. Глубокие риски при механическом скрайбировании получают путем увеличения нагрузки на резец, что сопряжено со значительным снижением стойкости резцов и расширением дефектной зоны, т. е. с потерей площади пластины.

В связи с этим перспективными являются методы бесконтактного скрайбирования, и прежде всего *лазерное скрайбирование.* Обработка на установках с использованием импульсного ОКГ на алюмоитриевом гранате с неодимом (частота следования импульсов до 100 c^{-1}) показывает эффективность лазерного скрайбирования. Глубокие риски получают с достаточно чистыми краями. Ширина резания, включая дефектную зону, составляет 120 мкм, что позволяет сэкономить материал пластины и увеличить выход кристаллов на 5%. Благодаря полной и качественной ломке пластин сокращается в несколько раз время разделения пластин на кристаллы.

Недостаток лазерного скрайбирования — малая скорость резания (60 мм/мин против 1—2 м/мин при механическом скрайбировании).

Ломка проскрайбированных пластин — это весьма ответственная операция. При неправильном разламывании даже хорошо проскрайбированных пластин возникает брак: царапины, сколы, неправильная геометрическая форма кристаллов и т. п. В процессе ломки пластина лежит рисками вниз на гибкой опоре (резиновая подкладка), а стальные или резиновые валики диаметром 10—20 мм с небольшим давлением прокатывают пластину последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, пластину сначала разламывают на полоски, а затем на отдельные прямоугольные или квадратные кристаллы. Валик должен двигаться строго параллельно направлению скрайбирования, иначе ломка будет происходить не по рискам. Во избежание смещения полосок или отдельных кристаллов относительно друг друга между пластиной и роликом целесообразно ввести эластичную тонкую пленку. Это помогает сохранить исходную ориентацию кристаллов и исключить их произвольное разламывание и царапание друг о друга.

Для ломки проскрайбированных пластин созданы различные установки, в том числе полуавтоматическая

установка ЭМ-202А. На этой установке ориентацию пластины в исходной позиции по перекрестию микроскопа, а также выгрузку кристаллов после ломки выполняют вручную. Процесс разламывания осуществляется автоматически.

Поворотное трехпозиционное устройство позволяет совместить вспомогательные приемы (установку и съем пластины) с основным технологическим временем ломки. Независимое и стабильное усилие ломки по каждому из двух направлений повышает качество ломки.

Технические характеристики установки ЭМ-202А для ломки полупроводниковых пластин

Максимальный диаметр разламываемой пластины	60 мм
Толщина разламываемых пластин	0,1—0,3 мм
Минимальное отношение длины меньшей стороны кристалла к толщине пластины	3 : 1
Усилие ломки	50—5000 г
Рабочая скорость перемещения ломочного валика	2—6 мм/с
Максимальная скорость обратного хода валика	6 мм/с
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 200 Вт
Габариты установки	960×660×1200 мм
Масса	130 кг

Другой способ ломки — ломка на сфере — иллюстрируется рис. 3.6. Пластину *1*, помещенную в полиэтиленовый пакет *2*, укладывают рисками вниз на резиновую диафрагму *3*. Сверху к пластине подводится до легкого касания и фиксируется замком *4* сферическая опора *5*. При подаче под диафрагму сжатого воздуха пластина

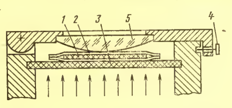


Рис. 3.6. Схема устройства для ломки пластин на сфере

прижимается к сферической поверхности, при этом разламывание пластины происходит одновременно в двух направлениях. Используя сферическую опору, можно получить качественное разламывание пластин только на кристаллы квадратной формы, подобрав при этом для данных размеров кристалла оптимальный радиус кривизны сферы.

Интерес представляет также возможность разделения скрайбированных пластин на кристаллы за счет температурных деформаций.

§ 3.2. Общие сведения о монтажно-сборочных операциях

Монтажно-сборочные операции составляют этап индивидуальной обработки микросхем и существенным образом определяют трудоемкость их изготовления, стоимость и надежность.

Характер монтажно-сборочных операций (включая герметизацию) зависит от типа применяемого корпуса и его конструктивной разновидности.

Основные требования, предъявляемые к корпусу, следующие:

1) механическая прочность и герметичность, обеспечивающие надежную защиту микросхемы от воздействия окружающей среды и механических повреждений;

2) высокая теплопроводность;

3) возможность надежного электрического соединения контактных площадок микросхем с выводами корпуса;

4) возможность надежного крепления микросхемы при монтаже в аппаратуре;

5) простота изготовления и герметизации;

6) низкая стоимость.

Первые два требования обычно находятся в противоречии с двумя последними: пока не разработаны простые и дешевые корпуса, способные надежно защищать схему в тяжелых условиях эксплуатации. Испытания показывают, что интенсивность отказов ИС в трудоемких и дорогостоящих керамических корпусах в 3—10 раз ниже, чем в самых дешевых полимерных корпусах. Высокая интенсивность отказов микросхем в полимерных корпусах объясняется их низкой влагостойкостью. Молекулы воды, размеры которых порядка 3Å, проникают внутрь

корпуса не только по границам раздела корпус — вывод, но и через толщу полимера.

В зависимости от материалов корпуса делятся на следующие типы: металлостеклянные, стеклянные, керамические, металлополимерные, пластмассовые, полимерные.

В больших гибридных схемах и микросборках, в которых предусматривается общая герметизация, применяют также бескорпусные микросхемы. В этом случае поверхность микросхемы покрывают слоем компаунда, временно защищающего микросхему и обеспечивающего дополнительное крепление выводов. Во избежание повреждений микросхему до монтажа хранят во временной таре.

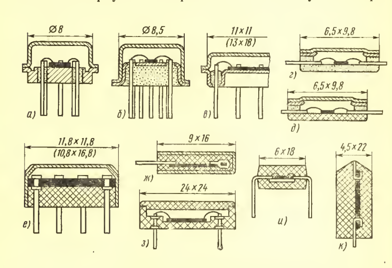


Рис. 3.7. Схемы конструкций корпусов микросхем:
а, б, в — металлостеклянных; *г* — стеклянного; *д* — керамического; *е, ж* — металлополимерных; *з* — пластмассового; *и, к* — полимерных

Основные типы корпусов и их конструктивные разновидности представлены на рис. 3.7.

Монтажно-сборочные операции выполняют в три этапа:

1) установка и крепление подложки микросхем на основании корпуса; установка и крепление навесных приборов на подложке (для пленочных гибридных схем);

2) присоединение выводов навесных элементов к контактным площадкам (для пленочных гибридных схем);

монтаж перемычек, соединяющих контакты микросхемы с внешними выводами корпуса;

3) герметизация корпуса.

Каждый этап выполняют в условиях более или менее значительного нагрева. Нагрев не должен вызывать необратимых изменений параметров элементов и снижения их прочности сцепления с подложкой. Кроме того, нагрев на каждом этапе не должен снижать качества соединений, полученных на предшествующем этапе. Выбор рабочей температуры, а следовательно, и способа соединения определяется конкретной конструкцией микросхемы в корпусе и характером температурных полей, возникающих в процессе соединения.

§ 3.3. Крепление подложек и кристаллов

Метод крепления подложки микросхемы к основанию корпуса должен обеспечивать хорошее согласование температурных коэффициентов линейного расширения (TKl) и хороший отвод тепла, а также стойкость к ударам (до 150 g) и вибрациям (5—5000 Гц при 40 g). Выбор метода зависит прежде всего от материалов соединяемых деталей.

В практике производства микросхем возникает необходимость монтажа ситалловых подложек на металлические, керамические и пластмассовые основания корпусов, а кремниевых кристаллов — на ситалловые, стеклянные, керамические и металлические поверхности.

Значения TKl [град$^{-1}$] для конструкционных материалов, широко используемых в микроэлектронике:

Ковар (сплав Н29К18)	$47 \cdot 10^{-7}$
Керамика 22ХС	$70 \cdot 10^{-7}$
Кремний	$76 \cdot 10^{-7}$
Ситалл	$60 \cdot 10^{-7}$
Стекла различных составов	$(40—120) \cdot 10^{-7}$
Эпоксидная смола (без наполнителя)	$70 \cdot 10^{-6}$

Наиболее простым способом монтажа ситалловых подложек на основания различных типов корпусов, а также кристаллов на ситалловые, стеклянные и керамические поверхности является *приклеивание эпоксидными клеями* холодного и горячего отверждения. Выбор клеев на основе эпоксидных смол обусловлен прежде всего высокой адгезией этих смол к различным материалам.

Недостатками клеевых соединений являются:

1) наличие внутренних напряжений вследствие первичной усадки при полимеризации (уплотнение структуры), усадки при охлаждении (для клеев горячего отверждения), разницы температурных коэффициентов линейного расширения соединяемых деталей и клея;

2) невысокая механическая прочность и теплопроводность.

Выбор клея холодного или горячего отверждения зависит от соотношения *TKl* соединяемых деталей и клея. Правильный выбор типа клея позволяет снизить внутренние напряжения. В ряде случаев целесообразно введение в клей пластификатора, снижающего внутренние напряжения. Кроме того, *TKl* клея можно уменьшить, вводя в него минеральные наполнители (например, пылевидный кварц). При этом несколько повышается механическая прочность и теплопроводность клеевой прослойки.

Клеевые соединения осуществляют путем нанесения на хорошо очищенную и обезжиренную поверхность дозированного количества клея, установки подложки (кристалла), легкого придавливания, сушки и последующей полимеризации.

Для получения соединений повышенной механической прочности и теплопроводности ситалловой подложки с металлической поверхностью может быть применено *«приклеивание» легкоплавкими стеклами.* Легкоплавкое стекло (примерный состав: PbO — 58%, B_2O_3 — 12%, SiO_2 — 20%, ZnO — 8%) в виде суспензии на деионизованной воде наносят на очищенные поверхности, детали соединяют, сушат, а затем нагревают в контролируемой атмосфере до температуры 440° С, при которой происходит полное расплавление стекла и «склеивание» деталей. Спай металл — стекло получается высокопрочным, если на поверхности металла имеется тонкая окисная пленка, способствующая химическому взаимодействию.

Для монтажа кремниевых ИС на металлическую (или металлизированную) поверхность основания корпуса целесообразно применение *пайки металлическими сплавами,* обеспечивающими высокую механическую прочность и теплопроводность. Широкое применение нашел эвтектический сплав золота с кремнием (около 6%), имеющий температуру плавления 370° С. Сплав в виде миниатюрной шайбы помещают между кристаллом и металличе-

ским основанием, пайку производят в защитной среде аргона, гелия или азота, которая может служить также и нагревательной средой.

Для выполнения этой операции разработаны различные установки (в том числе и автоматические). На установке ЭМ-414, например, кристалл и припой фиксируются автоматически с точностью ±0,1 мм относительно корпуса, установленного в кассете. Кассета предварительно нагревается, проходя нагревательную колонку. Установка обеспечивает нагрев в рабочей зоне до 450° С, усилие на присоединяемые детали в пределах 30—200 г и выдержку от 0,04 до 3,96 с (с интервалом 0,04 с). Инструменту, сдавливающему детали, сообщаются ультразвуковые колебания.

Большой интерес представляет разновидность указанного метода — *пайка за счет контактного плавления*, выполняемая без припоя. В этом случае металлическая поверхность (ковар, никель) должна иметь золотое покрытие, а нижняя поверхность кристалла должна быть освобождена от пассивной пленки. Сущность метода сводится к тому, что при приложении усилия сжатия (порядка 100 г) и температуры, несколько превышающей эвтектическую, происходит взаимная диффузия золота и кремния. При плавном изменении концентрации должен существовать слой, состав которого соответствует эвтектическому. При указанной температуре этот слой расплавляется, осуществляя соединение деталей. Процесс интенсифицируется, а качество пайки улучшается при наложении ультразвуковых колебаний (около 60 кГц).

Универсальная установка ЭМ-415 для пайки кристаллов (неавтоматизированная) позволяет припаивать кристаллы размерами от 0,5×0,5 до 2×2 мм без припоя. Корпус устанавливается на нагревательной колонке (температура нагрева рабочей зоны до 450° С), кристалл захватывается инструментом, нагревательная колонка подводится под инструмент и кристалл опускается. Усилие инструмента 10—180 г, время пайки 2—3 с.

§ 3.4. Присоединение выводов

Монтажные операции, связанные с присоединением выводов, осуществляют в целях:

1) создания внутрисхемных соединений при монтаже кристаллов (интегральных схем, диодных и транзистор-

ных матриц, отдельных приборов) в гибридных пленочных и многокристальных микросхемах;

2) создания электрических соединений между контактными площадками тонкопленочных и полупроводниковых микросхем и внешними выводами корпуса.

В большинстве современных конструкций микросхем предполагается присоединение выводов с помощью проволочных перемычек круглого сечения.

В качестве материала перемычек используют золото 999,9 (∅ 25—60 мкм), медь ММ (∅ 50—100 мкм), медь ММ луженую (∅ 100—150 мкм), алюминий (∅ 50—100 мкм).

Контактные площадки микросхем чаще всего выполняют из Al (полупроводниковые ИС и гибридные тонкопленочные схемы), Au, Ag, Al и Ni (гибридные тонкопленочные схемы), Ag и Cu с лужением (гибридные тонкопленочные и толстопленочные схемы).

Выводы корпуса (круглые или плоские) изготавливают обычно из золоченого или алюминированного ковара или никеля (полупроводниковые и тонкопленочные гибридные микросхемы) или из луженой меди (толстопленочные гибридные схемы).

Наиболее сложная задача — присоединение проволочных выводов-перемычек к тонким пленкам. Основные трудности обусловлены малой толщиной пленок, хрупкостью подложек, большой разницей в толщинах соединяемых деталей и их физических свойств.

С учетом этих особенностей для микроэлектроники разработаны специальные методы микросварки, с помощью которых предполагается получение соединений за счет взаимной диффузии в твердой фазе, а также межатомных связей на границе раздела чистых поверхностей.

Основные требования, предъявляемые к соединению, сводятся к обеспечению прочности не ниже прочности адгезии пленки к подложке; высокой проводимости, стабильной во времени; достаточно большой площади взаимного контакта соединяемых деталей (не менее 0,1—0,5 мм^2).

В зависимости от применяемых материалов и конструктивных особенностей микросхемы используют следующие методы соединений:

1) термокомпрессионная сварка;

2) сварка давлением с косвенным импульсным нагревом;

3) сварка сдвоенным электродом;
4) ультразвуковая сварка;
5) пайка.

Термокомпрессионная сварка представляет собой сварку давлением с подогревом. Необходимое давление прикладывают к инструменту (рис. 3.8), а рабочая температура обеспечивается нагревом либо инструмента, либо рабочего стола с изделием, либо того и другого одновременно. Рабочая температура поддерживается постоянной в течение всего времени работы установки.

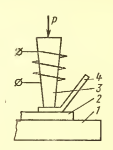


Рис. 3.8. Схема термокомпрессионной сварки с подогревом инструмента: 1 — рабочий стол, 2 — подложка с тонкой пленкой, 3 — инструмент с нагревателем, 4 — проволочный проводник

Пластические деформации, возникающие в зоне контакта соединяемых деталей, способствуют вытеснению адсорбированных газов и загрязнений. В результате обнажения чистых поверхностей становится возможным электронное взаимодействие соединяемых материалов (образование межатомных связей). Получению прочного соединения способствует также ограниченная взаимная диффузия материалов и образование твердого раствора в тонкой приграничной области.

Во избежание разрушения соединения вследствие остаточных напряжений материал проволоки должен быть пластичным. С этой целью проволоку предварительно подвергают рекристаллизационному отжигу.

Наилучшей свариваемостью обладают пары Ag — Au и Au — Cu, так как им присуща высокая взаимная диффузия. При сварке Au и Al взаимная диффузия приводит к образованию интерметаллических соединений ($AuAl_2$, Au_2Al, Au_5Al и др.), некоторые из которых обладают хрупкостью или рыхлостью. Удовлетворительной сварки не удается достичь на кремниевых подложках вследствие каталитического влияния кремния.

Термокомпрессионную сварку выполняют при невысоких удельных давлениях и температурах. Поэтому для получения больших пластических деформаций диаметр вывода не должен превышать 100—130 мкм. Важным условием выполнения качественного соединения является тщательная подготовка поверхности соединяемых дета-

лей (травление, обезжиривание), а также защита их от окисления в процессе сварки (применение защитной среды азота, аргона и т. д.).

Тип термокомпрессионного соединения (форма и размеры деформируемого участка вывода) зависит от размеров и конструкции инструмента. Возможны два основных типа соединения: внахлестку и встык. На рис. 3.9 показана последовательность образования проволочной перемычки между контактной площадкой и внешним выводом корпуса при использовании капиллярного инструмента для соединения внахлестку (рис. 3.9, *а*) и встык (рис. 3.9, *б*). Во втором случае обрезка проволоки (электрической дугой или газовой горелкой) сопровождается образованием шарика.

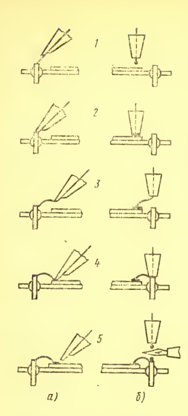


Рис. 3.9. Образование проволочных перемычек при термокомпрессионной сварке капиллярным инструментом:

1 — совмещение проволоки и инструмента с контактной площадкой; *2* — сварка первой точки; *3* — совмещение проволоки и инструмента с контактной площадкой; *4* — сварка второй точки; *5* — обрезка проволоки

Соединения внахлестку (рис. 3.9, *а*) реализуют, например, на установке ЭМ-407. Рабочий стол (он же нагреватель) имеет перемещение в горизонтальной плоскости в пределах 15×15 мм. Перед сваркой обе контактные площадки выставляют параллельно линии перекрестия окуляра микроскопа. Точность совмещения инструмента с контактной площадкой ± 3 мкм. Температура нагрева рабочей зоны до 400±5° С. Величина давления 20—180 г, время выдержки при сварке 1—10 с. Подъем инструмента после окончания выдержки — автоматический. При втором подъеме инструмента производится обрыв проволоки.

На установке ЭМ-405 соединения выполняют методом сварки встык (рис. 3.9, *б*). После сварки вывод отрезают ножницами. Оплавление шарика (диаметр 0,1—0,12) на конце проволоки, выходящей из инструмента, производится электрической дугой. Специальный механизм обеспечивает автоматическое подтягивание проволоки с шариком к торцу инструмента при его опускании. Первую сварную точку выполняют встык, вторую — внахлестку. Длина проволочной перемычки (регулируемая) в пределах 3—8 мм.

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН) отличается от компрессионной сварки тем, что разогрев рабочей зоны осуществляется только в момент сварки импульсом тока, проходящего непосредственно через инструмент. Благодаря этому имеется возможность получить более высокий локальный нагрев проводника и, следовательно, сваривать малопластичные материалы. СКИН обладает более широкими технологическими возможностями и позволяет получать качественные соединения золотых, алюминиевых и медных проводников (диаметром до 100 мкм) с пленками многих материалов.

Для выполнения СКИН инструмент должен иметь *V*-образную форму (рис. 3.10); причем максимальная температура должна быть на рабочем торце. Для нагрева инструмента может быть использован импульс постоянного или переменного тока. Для смягчения термоудара на пленочную контактную площадку целесообразен сопутствующий подогрев изделия (т. е. рабочего стола).

В отличие от термокомпрессии процесс взаимной диффузии при СКИН играет более существенную роль в образовании соединения. При выполнении СКИН в начале прикладывается давление. Затем через инструмент подается импульс тока длительностью от 0,01 до нескольких секунд. Под действием температуры торца инструмента происходит локальный разогрев проволоки, уменьшение предела пластичности, осадка проволоки и соединение. При соединении, например, алюминиевой проволоки с алюминиевой, золотой и медной пленкой температура в зоне сварки должна составлять соответственно 400, 490 и 560° С.

Сварка сдвоенным (расщепленным) электродом является разновидностью контактной точечной электро-

сварки, приспособленной к особенностям соединений в микросхемах. Малые площади соединений и малая толщина пленок требуют локализации нагрева при одностороннем расположении электродов. Инструмент (рис. 3.11) представляет собой два электрода с шириной рабочей части (торца) каждого электрода 0,1 мм, разделенных изолирующей прослойкой толщиной порядка 0,05 мм.

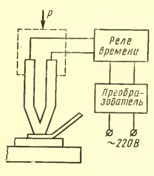


Рис. 3.10. Схема сварки давлением с косвенным импульсным нагревом

Рис. 3.11. Схема сварки сдвоенным электродом

В процессе сварки проволочный проводник на участке под инструментом является составной частью электрической цепи. Разогрев проводника осуществляется за счет выделения тепла в месте контактов проволока — электроды. В зависимости от условий сварки (длительности, мощности и скважности импульсов и времени выдержки под током) могут иметь место следующие механизмы соединения:

1) соединение в твердой фазе в результате рекристаллизации соединяемых материалов и прорастания зерен через поверхность раздела;

2) соединение ниже температуры рекристаллизации за счет электронного взаимодействия и атомного сцепления;

3) соединение в жидкой фазе в результате расплавления.

Воспроизводимость качества соединения существенно зависит от повторяемости величины электрического соп-

ротивления в месте контакта. Поэтому сварочные установки предусматривают автоматическое регулирование усилия давления (0,3—1 кГ) инструмента по заданному контактному сопротивлению. Условием получения качественного соединения является также деформация проводника не менее 40%.

Ультразвуковая сварка является разновидностью сварки давлением (холодной или с косвенным нагревом).

Ультразвуковые колебания возбуждаются в магнитострикционном преобразователе (см. рис. 3.12) и с помощью волновода (концентратора), служащего для увеличения амплитуды, и сварочного инструмента передаются свариваемым деталям. Энергия колебаний преобразуется в сложные напряжения растяжения, сжатия и среза. При превышении предела упругости материала в зоне контакта возникают пластические деформации и пленка окисла разрушается, обнажая чистую поверхность. При этом материалы схватываются за счет электронного взаимодействия.

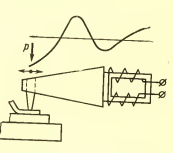


Рис. 3.12. Схема ультразвуковой сварки с косвенным импульсным нагревом

Косвенный нагрев инструмента облегчает пластические деформации и улучшает качество соединения. Вначале осуществляется сдавливание соединяемых деталей, далее пропускается импульс тока через инструмент, а затем (или одновременно) создаются ультразвуковые колебания.

К преимуществам ультразвуковой сварки можно отнести: невысокую температуру в зоне контакта, возможность соединения трудносвариваемых разнородных материалов (и даже диэлектриков) и невысокие требования к состоянию поверхности.

Ограничением метода является требование высокой пластичности материала проводника, так как деформация должна достигать 50—60%. Удельные давления должны составлять несколько килограммов на 1 мм^2.

Основными параметрами процесса являются амплитуда колебаний (порядка 5—10 мкм при частоте 40—

60 кГц) и удельное давление. Время сварки должно быть оптимальным: при малом времени физический контакт соединяемых поверхностей может оказаться малым, при большом времени наблюдается разрушение узлов схватывания.

Таблица 3.2

Свариваемость материалов при различных методах микросварки

Материал контактной площадки и подложки	Методы сварки и материалы проволочных выводов											
	Термокомпрессия нагретым инструментом			Сварка косвенным импульсным нагревом			Контактная сварка сдвоенным электродом			Ультразвуковая сварка		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Золотая пленка с подслоем нихрома на ситалле или стекле . .	++	+	—	++	++	+	++	—	++	++	++	+
Медная или никелевая пленка с подслоем нихрома на ситалле . . .	++	+	—	++	++	+	++	—	+	++	+	+
Алюминиевая пленка на ситалле или стекле . .	++	+	—	+	+	—	+	—	+	++	+	—

Примечание. ++ свариваются хорошо; + свариваются удовлетворительно; — не свариваются.

В установке ЭМ-404 для ультразвуковой сварки использован инструмент капиллярного типа, который может совершать продольные или крутильные колебания в зависимости от установленного сменного волновода. Давление инструмента на свариваемые элементы регулируется в пределах 20—150 г, время сварки выдерживается с точностью ± 0,02 с. Ультразвуковой генератор может работать с частотой 58—65 кГц и с выходной мощностью 0,1—28 Вт. На установке можно приваривать золотые, алюминиевые и медные проволоки диаметром 20—100 мкм. Установка имеет нагревательную колонку, что позволяет работать с подогревом изделия.

В табл. 3.2 приводятся данные по выбору метода соединения проволочных проводников с тонкопленочными контактными площадками.

Пайку перемычек к контактным площадкам можно осуществлять с дозированием припоя в процессе пайки или с предварительным лужением контактных площа-

док. Последний способ является более прогрессивным, так как предполагается нанесение припоя высокопроизводительным методом погружения. Такой способ используют, например, в тонкопленочных гибридных схемах серии К217 (медные луженые контакты), а также в толстопленочных гибридных схемах серий К202, К204 (серебряные луженые контакты) и некоторых других.

Особенностью лужения тонкопленочных контактов является опасность их ослабления из-за растворения (диффузии) материала пленки в припой. Поэтому для лужения золотых и серебряных контактов применяют припой ПОС-61, модифицированный золотом или серебром (3%). Температура плавления этих припоев 190° С.

Чтобы после облуживания и пайки избежать промывки микросхем, используют пассивные флюсы марок ФПП или ПлП.

Пайку можно осуществлять с помощью микропаяльников с косвенным импульсным нагревом (время импульса до 2 с), с автоматическим регулированием режима нагрева по температуре, для чего в конструкции паяльника предусмотрена термопара. Другой способ — пайка сдвоенным электродом, при котором тепло выделяется за счет прохождения тока через участок припоя, расположенный под зазором сдвоенного электрода.

Особенности монтажа кристаллов с жесткими выводами. Кристаллы с жесткими выводами (контактными выступами, шариковыми выводами *) монтируют в корпус ИС или на подложку гибридной микросхемы в перевернутом виде (выводами вниз). Поэтому первой задачей является точное совмещение выводов с контактными площадками.

Монтажу кристаллов должна предшествовать предварительная ориентация по положению («вверх — вниз») и углу (соответствие выводов определенным контактным площадкам). Предварительную ориентацию осуществляют на специальных автоматах (например, ЭМ-433). Кристаллы из вибробункера поступают к ориентатору положения, который пропускает кристаллы только выводами вниз.

---

* Шариковые выводы используют в полупроводниковых бескорпусных приборах.

Из вибробункера кристаллы захватываются вакуумным присосом и переносятся на многопозиционную поворотную головку. Здесь кристалл контактирует через выводы с измерительной схемой, в результате чего определяется истинное положение кристалла по углу и происходит его разворот на 90, 180 или 270°. В последней позиции происходит укладка ориентированных кристаллов в кассеты. Производительность автомата 1800 кристаллов в час.

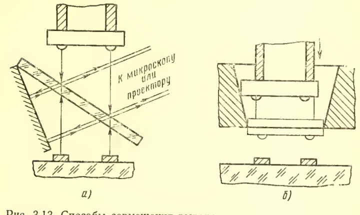


Рис. 3.13. Способы совмещения выводов с контактными площадками при монтаже перевернутого кристалла:
а — с помощью полупрозрачного зеркала (одни из возможных вариантов); *б* — с помощью направляющего отверстия

Вторичная ориентация кристалла (совмещение выводов с контактными площадками) происходит непосредственно на установке совмещения. При этом кристалл захватывается инструментом-присосом из кассеты. Вторичная ориентация может выполняться следующим образом:

1) путем наблюдения через полупрозрачное зеркало картины расположения выводов относительно контактов и совмещения их с помощью микроскопа или микропроектора;

2) с помощью специального центрирующего отверстия-фильеры, предварительно ориентированного относительно контактных площадок.

В первом случае (рис. 3.13, *а*) одновременно наблюдают выводы и контактные площадки и путем перемеще-

ния рабочего стола добиваются их совмещения. После совмещения полупрозрачное зеркало убирается, а инструмент с кристаллом перемещается вниз.

Во втором случае (рис. 3.13, *б*) вначале визуально совмещают центрирующее отверстие-фильеру с контактными площадками. Затем при опускании инструмента-присоса происходит центрирование кристалла за счет смещения его в горизонтальной плоскости. Точность этого метода зависит от точности размеров кристалла по контуру.

Из условия прочности соединения смещение вывода относительно кромки контактной площадки не должно превышать 0,3 d, где d — диаметр вывода.

В зависимости от сочетания материалов выводов и контактных площадок присоединение может осуществляться:

1) термокомпрессионной микросваркой или пайкой с постоянным или импульсным нагревом;

2) ультразвуковой сваркой;

3) комбинированной сваркой или пайкой (ультразвуковые колебания и импульсный нагрев).

Термокомпрессионная сварка дает наилучшие результаты в случае золотых выводов и контактных площадок (или с золотым покрытием).

Ультразвуковую сварку используют для алюминиевых выводов и контактных площадок. Комбинированная сварка или пайка допускает соединение различных сочетаний материалов.

При групповом присоединении жестких выводов предъявляются повышенные требования к равномерности высоты выводов. Для обеспечения более равномерного распределения сжатия между отдельными выводами и устранения непараллельности поверхности подложки и торца инструмента применяют специальные устройства — выравниватели.

Для присоединения кристаллов с жесткими выводами применяют установку ЭМ-431, а также ее автоматизированный вариант — многопозиционную установку ЭМ-432.

В установке ЭМ-431 предусмотрена регулировка задержки подачи ультразвуковых колебаний относительно начала контактирования, что существенно влияет на стабильность качества соединения. В начале контактирования прикладывается повышенное кратковременное усилие (что позволяет компенсировать разновысотность

выводов), а к началу ультразвуковых колебаний оно снижается. Установка содержит устройство совмещения с помощью полупрозрачного зеркала. Фиксирование подложки осуществляется вакуумным присосом. Предварительное (грубое) совмещение контактных площадок с инструментом осуществляется перемещением рабочего стола, а точное совмещение — с помощью микроманипулятора. Контроль совмещения производят с помощью микроскопа МБС-1 или микропроектора.

Технические характеристики установки ЭМ-431

Точность совмещения	±0,01 мм
Перемещение рабочего стола в горизонтальной плоскости .	30×20 мм
Диапазон регулирования усилия сжатия:	
первичное усилие	350—1500 г
вторичное усилие	100—700 г
Диапазон регулирования температуры рабочего стола . .	100—350° С
Диапазон регулирования температуры импульсного нагрева инструмента	150—450° С
Диапазон регулирования времени присоединения	0,04—4,5 с
Диапазон частот ультразвукового генератора	59—61 кГц
Производительность	500 кристаллов в час
Электропитание и потребляемая мощность	200 В, 50 Гц, 300 Вт
Габариты установки	1200×660×1180 мм
Масса	140 кг

§ 3.5. Герметизация микросхем

Технологические способы герметизации микросхем должны удовлетворять следующим общим требованиям:

1) обеспечивать прочность и сохранять герметичность во всем температурном диапазоне работы схемы;

2) не вызывать нагрева активных элементов свыше 300° С;

3) не вызывать выделения газов и паров металла внутри корпуса;

4) выполняться в среде осушенного и очищенного воздуха, азота или инертного газа с точкой росы не выше — 25° С;

5) обеспечивать возможность механизации и автоматизации.

В зависимости от конструкции корпуса в практике производства находят применение следующие способы герметизации: холодная сварка давлением, электроконтактная конденсаторная сварка, пайка, заливка компаундами, склеивание, опрессовка компаундами.

Холодную сварку давлением используют для металлостеклянного корпуса, изображенного на рис. 3.7, *а* (корпус ранней конструкции). Специфическим условием получения качественного герметичного соединения является высокая пластичность материала по крайней мере одной из соединяемых деталей. Обычно баллон выполняют из меди М1, а ножку — из ковара, обеспечивающего хорошее согласование TKl со стеклянными изоляторами коваровых выводов. Поскольку холодная сварка связана со значительной деформацией (относительная деформация до 80%), толщина соединяемых деталей должна быть не менее 0,3 мм, а на ножке должна выполняться защитная канавка, разгружающая хрупкие стеклянные изоляторы. Коваровую ножку делают достаточно толстой (1 мм), чтобы обеспечить необходимую прочность и герметичность стеклянных изоляторов.

Важным условием получения качественного шва является чистота и отсутствие окислов на соединяемых поверхностях. Целесообразно медный баллон предварительно никелировать. В процессе сдавливания хрупкая никелевая пленка разрушается, обнажая чистую поверхность меди.

Процесс может быть выполнен, например, на полуавтомате И020.0007/Т. Полуавтомат позволяет осуществлять холодную сварку корпусов диаметром до 20 мм в контролируемой среде. Сварка производится подвижным верхним и неподвижным нижним пуансонами. Усилие для сварки (до 1000 кГ) создается гидравлическим цилиндром с максимальным рабочим давлением 50 ат. Загрузку деталей в гнезда 12-позиционной карусели выполняют вручную, выгрузку сваренных изделий — автоматически. Для создания нейтральной среды в зоне сварки полуавтомат снабжен герметичным колпаком. Производительность полуавтомата 600—900 шт/ч.

Электроконтактная конденсаторная сварка допускает соединение тонкостенных (0,15 мм) баллона и ножки, получаемых штамповкой. В круглом металлостеклянном корпусе (рис. 3.7, *б*) прочность и герметичность выводов увеличены за счет заполнения стеклом полой тонкостен-

ной коваровой ножки. Глубоко расположенный сварной шов исключает возможность выплескивания металла внутрь корпуса. Материал ножки — ковар, баллона — ковар, никель, сталь 10 (с защитным покрытием).

Полуавтоматическая установка конденсаторной сварки УКС-4100 позволяет осуществлять герметизацию круглых корпусов в защитной атмосфере гелия (расход 10 л/мин). Загрузку деталей выполняют вручную, остальные операции — автоматически. Диапазон усилия сжатия электродов 50—350 кГ. Производительность установки 500 шт/ч.

Методом конденсаторной сварки герметизируют также металлостеклянные корпуса квадратной и прямоугольной формы (рис. 3.7, *в*).

Пайка. Герметизацию пайкой применяют в стеклянных (микросхемы серии К106 и др.) и керамических (микросхемы серии ТСМ) корпусах с плоскими планарными выводами (рис. 3.7, *г*, *д*). В первом случае стеклянное основание получают в форме (прессование стеклянного порошка с последующим оплавлением) одновременно с системой выводов и коваровой рамкой. Во втором случае вначале изготавливают керамическое основание с пазами под выводы, а затем выполняют пайку стеклом коваровых выводов и рамки. В обоих случаях для облегчения изготовления основания корпуса плоские выводы объединены в общую систему с помощью технологической рамки (рис. 3.14). Впоследствии после выполнения внутреннего монтажа (перед электрическим контролем) технологическая рамка отрезается штампом, разобщая выводы микросхемы.

Золотое покрытие на коваровой рамке позволяет получать надежное паяное соединение с крышкой корпуса (никель, никелированная медь и др.). С этой целью на коваровую рамку укладывают рамку из припоя ПОС-61 толщиной 0,15—0,2 мм, устанавливают крышку и корпус с микросхемой помещают на нагреватель, снабженный вибратором (50 Гц). Наличие бортика по контуру рамки исключает проникновение припоя внутрь корпуса.

Для пайки корпусов применяют автоматические и полуавтоматические установки. На установке АГМП-1 (автомат герметизации микросхем пайкой) пайку выполняют в среде инертного газа. Корпуса устанавливают в кассеты, обеспечивающие регулируемое усилие прижима на крышку корпуса в пределах 3—10 г. Кассеты, содержа-

щие по 10 корпусов каждая, помещают в магазин (емкость магазина 20 кассет). Расплавление рамки припоя осуществляется импульсным нагревом в диапазоне регулируемых температур (150—450) ± 3° С. Во избежание термоудара изделие подвергают предварительному нагреву в пределах (100—200) ± 10° С. Время пайки (ре-

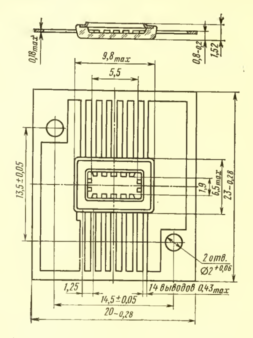


Рис. 3.14. Стеклянный корпус с технологической рамкой (крышка корпуса не показана)

гулируемое) 5—15 с с дискретностью 1 с. Вибрация может быть наложена со смещением по времени от начала пайки на 2—12 с. Расход инертного газа давлением 1,5—2 ат составляет 0,5 м³/ч. Производительность установки 450 корпусов в час.

Заливка. В металлополимерных корпусах герметизацию микросхемы и изоляцию выводов от корпуса осуществляют путем заливки металлического корпуса эпоксидным компаундом. В конструкции, изображенной на рис. 3.7, *е*, корпус представляет собой дюралевый колпачок квадратной или прямоугольной формы (толстопле-

ночные гибридные микросхемы серии К202, К204, К215 и др.), в который устанавливается керамическая подложка с микросхемой и торцевыми выводами круглого сечения. Специально сформированные выступы на внутренней поверхности колпачка удерживают подложку на некотором расстоянии от дна.

В другой конструкции (рис. 3.7, *ж*) в корпусе типа «пенал» располагается ситалловая подложка с тонкопленочной гибридной схемой (микросхемы серии МИГ), изолированной от стенок корпуса. В данном случае активные навесные приборы помещены в кассету из алюминиевой фольги (с изолированной прокладкой), которая приклеена к подложке. Такая конструкция обеспечивает дополнительную герметизацию активных приборов и защиту их от непосредственного воздействия компаунда.

В металлополимерных корпусах целесообразно использовать свободную заливку компаундами холодного отверждения, которые обеспечивают относительно малую усадку, а время выдержки для полимеризации не является лимитирующим фактором.

Склеивание. Один из вариантов пластмассовых корпусов показан на рис. 3. 7, *з*. Основание и крышка корпуса изготовлены из стеклопластика АГ-4 методом прессования. Основание армировано торцевыми выводами круглого сечения. Герметизацию осуществляют путем склеивания крышки с основанием.

Опрессовка. Наиболее дешевыми являются полимерные корпуса, получаемые путем опрессовки микросхемы компаундом. Полимерные корпуса используют в основном для толстопленочных гибридных и полупроводниковых интегральных микросхем, работающих в нормальных условиях (промышленная и бытовая аппаратура).

Опрессовку микросхем осуществляют методом литья под давлением во временные формы компаундов горячего отверждения. Ввиду давления и высокой температуры требуется предварительная защита собранного узла (особенно проволочных перемычек) с помощью компаундов холодного отверждения.

На рис. 3.7, *и* показан вариант микросхемы в полимерном корпусе, где кристалл механически связан с контактной рамкой посредством ситалловой подложки. Ситалловую подложку приклеивают к системе плоских выводов, связанных технологической рамкой, а кристалл наклеивают на ситалловую подложку. Другой вариант

заключается в том, что один из плоских выводов изготавливают более длинным и его конец находится в центре системы выводов. На этот вывод непосредственно монтируют кристалл.

После монтажа проволочных перемычек между контактными площадками кристалла и выводами корпуса производят предварительную защиту кристалла с перемычками каплей компаунда. Когда отверждение компаунда завершено, узел направляется на заливку под давлением. После герметизации технологическая рамка отделяется в штампе, а выводы формуются, как показано на рисунке.

Наилучшими герметизирующими свойствами обладают компаунды на фенольно-эпоксидной основе. Они характеризуются минимальным содержанием загрязняющих ионов, имеют температуру стеклования выше 150° С и усадку в форме 0,6—0,8%. В результате прессования в материале корпуса имеют место сжимающие усилия, что уменьшает интенсивность отказов из-за тепловых деформаций.

Прессование (заливку под давлением) выполняют на механизированных или полуавтоматических установках при усилии прессования до 2000 кГ и скорости впуска материала до 20 мм/с. Время выдержки изделий под давлением прессования 20—40 с, а время выдержки в замкнутой форме при температуре прессования (вне пресса) от 3 до 5 мин.

Для толстопленочных микросхем присоединение плоских выводов контактной рамки можно осуществлять путем введения их в отверстия керамической платы, загибки их на контактные площадки платы и последующего облуживания методом погружения (рис. 3.7, *к*).

Выводы в технологических рамках целесообразно выполнять в отрезках ленты длиной до 250 мм на несколько микросхем. Это упрощает механизацию и автоматизацию монтажа, а также загрузку многоместных форм для заливки под давлением.

Большой экономический эффект дает метод беспроволочного монтажа полупроводниковых кристаллов на контактной рамке, позволяющий использовать групповые методы присоединения выводов *.

---

* Патенты США № 3698073 заявл. 13.10.70 и № 3698074 заявл. 29.06.70.

На рис. 3. 15 показана последовательность монтажа кристаллов с помощью промежуточной контактной рамки, заменяющей систему проволочных перемычек. Промежуточные контактные рамки получают в ленте алюминиевой фольги толщиной 70 мкм путем чеканки на прессе и последующего электрохимического избирательного травления (используется эффект утонения материала в результате чеканки на штампе). В итоге формируется система промежуточных выводов (рис. 3.15, *а*).

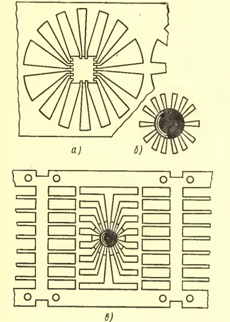


Рис. 3.15. Беспроволочный монтаж кристаллов

С помощью микроманипулятора и проектора (56 ×) контактные площадки кристалла совмещают с выводами промежуточной рамки (точность совмещения ± 2 мкм, размеры контактных площадок 0,12×0,12 мм) и групповым инструментом с наложением ультразвука производят их сварку (рис. 3.15, *а*). После предварительной герметизации компаундом холодного отверждения полуфабрикат отделяется от ленты (рис. 3.15, *б*) и совмещается с выводами наружной контактной рамки (никель, плакированный алюминиевой дорожкой). Сварку всех 14 выводов производят ультразвуковым методом (с нагревом и давлением) групповым инструментом (рис. 3.15, *в*). Заливку (герметизацию) можно выполнять в многоместных формах, куда помещается отрезок ленты, содержащий несколько контактных рамок. После отделения залитых микросхем из ленты, производится необходимая формовка выводов.

Технические характеристики установки ЭМ-434 для присоединения кристаллов к контактной рамке

Точность присоединения кристалла к контактной рамке	0,02 мм
Угол разворота рабочего стола манипулятора	±10°
Емкость кассеты для кристаллов	512 шт.
Размеры кристалла	1,4×1,4 и 1,8×1,8 мм
Число контактных площадок	14
Расстояние между осями контактных площадок	0,25±0,005 мм
Размеры контактных площадок	0,12×0,12 мм
Толщина ленты с контактными рамками	0,04—0,08 мм
Пределы регулирования давления инструмента	500—1000 г
Диапазон регулирования времени сварки	0,18—0,52 с
Мощность ультразвукового генератора	0—10 Вт
Частота ультразвуковых колебаний	59—61 кГц
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 700 Вт
Производительность установки	400 кристаллов в час
Габариты	1350×1225×1345 мм
Масса	400 кг

Технические характеристики установки ЭМ-435 для присоединения контактной рамки к наружным выводам

Емкость барабана с рамками наружных выводов	360 шт.
Толщина рамки с наружными выводами	0,2—0,25 мм
Пределы регулирования давления инструмента	10—25 кг
Мощность ультразвукового генератора	30—80 Вт
Частота ультразвуковых колебаний	56—61 Гц
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 1200 Вт
Производительность установки	500 схем в час
Габариты установки	1180×580×1200 мм
Масса	390 кг

Контроль герметичности корпусов. Одной из задач герметизации является предотвращение проникновения внутрь корпуса газов из окружающей среды, всегда содержащих влагу. Проникающая в корпус влага растворяет газы и загрязнения, образуя в условиях электрических напряжений электролитические пары. В свою очередь, это приводит к возникновению отказов, выражающихся в шунтирующих утечках, коротких замыканиях и обрывах.

Для полых (газонаполненных) корпусов достаточно объективным показателем качества герметизации может служить величина течи из корпуса. Для микросхем, опрессованных пластмассами, необходимо проводить испытания непосредственно в атмосфере с повышенной влажностью. Методы испытания должны одновременно удовлетворять требованиям высокой чувствительности и экономичности.

Наиболее чувствительным является *радиоактивный метод* (чувствительность 10^{-8}—$5 \cdot 10^{-9}$ мкм рт. ст.·л/с). Образцы, подлежащие испытанию, герметизируются в атмосфере сжатого радиоактивного газа (например, Kr^{85}). При испытании с помощью счетчиков регистрируется интенсивность гамма-излучения газа, вытекающего из корпуса. Вследствие сложности и высокой стоимости этот метод может быть рекомендован только в экспериментальном производстве (отработка конструкции корпуса или технологии герметизации).

Масс-спектрометрический метод основан на обнаружении гелиевым течеискателем гелия, предварительно введенного в корпус прибора. Применение гелия обусловлено его высокой проникающей способностью (малые размеры молекул). Чувствительность метода определяется чувствительностью течеискателя (для течеискателя ПТИ-6 10^{-7} мкм рт. ст.·л/с). Высокая проникающая способность гелия затрудняет обнаружение больших течей, так как к моменту испытания гелий может полностью вытечь из корпуса. Поэтому для образцов, подлежащих испытанию, целесообразно вводить гелий после герметизации, но непосредственно перед испытанием. Для этого герметизированные микросхемы выдерживают в течение нескольких суток в бомбе, заполненной гелием до давления 4 ат. Масс-спектрометрический метод целесообразен только для выборочного контроля.

При проверке герметичности вакуум-жидкостным методом микросхемы помещают в емкость с керосином или уайт-спиритом, над которым создается разрежение (10—15 мм рт. ст.). Вытекающий из корпуса газ (непрерывная струйка пузырьков) позволяет определить не только интенсивность, но и место расположения течи. Чувствительность метода $5 \cdot 10^{-3}$ мкм рт. ст.·л/с. Он является весьма распространенным в производстве для выборочного метода контроля.

Компрессионно-термический метод отличается от предыдущего тем, что испытуемые микросхемы погружают в нагретое масло. При этом давление газа внутри корпуса повышается и чувствительность метода несколько увеличивается ($4 \cdot 10^{-3}$ мкм рт. ст.·л/с).

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов И. Г. и др. Вакуумное оборудование для нанесения тонких пленок. Изд. ин-та «Электроника», 1969.

2. Бочкин О. И., Брук В. А., Никифорова-Денисова С. Н. Механическая обработка полупроводниковых материалов. «Высшая школа», 1973.

3. Голото И. Д., Докучаев Б. П., Колмогоров Г. Д. Чистота в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. «Энергия», 1975.

4. Иванов-Есипович Н. К. Технология микросхем. «Высшая школа», 1972.

5. Иванов Р. Д. Катодный метод создания пленочных элементов микросхем. «Энергия», 1972.

6. Майоров С. А., Скворцов А. М. Технология производства вычислительных машин. «Высшая школа», 1973.

7. Материалы и технологические процессы в интегральной электронике. Proceedings of the IEEE. Пер. с англ. «Мир», 1970.

8. Назаров Г. В., Гревцев Н. В. Сварка и пайка в микроэлектронике. «Советское радио», 1969.

9. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. «Высшая школа», 1972.

10. Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. «Энергия», 1968.

11. Технология толстых и тонких пленок. Пер. с англ. под ред. А. К. Катмана. «Мир», 1972.

12. Фотолитография и оптика. Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля. «Советское радио», 1974.

13. Юдин В. В., Туркин В. В. Метод ионного легирования и его промышленное применение. «Электронная промышленность», № 8, 1972.

ОГЛАВЛЕНИЕ

p.